INVESTIGACIÓN Y CIENCIA • SEPTIEMBRE 2019 N.º 516 • LAS REDES DE LA MENTE | WILCZEK Y LAS LEYES NATURALES | EL NACIMIENTO DE LA FOTOFARMACOLOGÍA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2019 • N.º 516 • 6,90 € • investigacionyciencia.es • Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

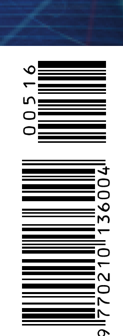
LAS REDES DE LA MENTE

Las conexiones neuronales que dan lugar al pensamiento

FARMACOLOGÍA
Fármacos que se controlan mediante la luz

FÍSICA
Frank Wilczek y la estética de las leyes naturales

BIOLOGÍA
La influencia de la vida social en la salud



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2019, Número 516

50

ARTÍCULOS





49



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Las señales frenéticas que recorren las redes de neuronas en todo el cerebro determinan, de alguna manera, nuestra capacidad de sentir, pensar y actuar. Los neurocientíficos de redes se sirven de herramientas matemáticas avanzadas para modelizar la complejidad inabarcable de los 100 billones de conexiones neuronales que se activan y, en última instancia, dan lugar a la mente. Ilustración de Mark Ross Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2019

CABEZA PARA LAS CARAS

En «Valor facial» [Investigación y Ciencia, abril de 2019], Doris Y. Tsao describe la técnica empleada por ella y sus colaboradores para predecir la manera en que las neuronas especializadas en reconocimiento facial responden ante una cara. A tal fin, emplean 50 coordenadas, o dimensiones, para parametrizar la forma y el aspecto de un rostro.

Algo intrigante y que no se comenta en el artículo es el número de «estados faciales» discernibles a los que da lugar dicha parametrización. Por poner un ejemplo, sin más que distinguir entre un valor nulo y otro máximo para cada coordenada, en un espacio de 50 dimensiones tendríamos $2^{50} \approx 10^{15}$ estados faciales distintos. Ello parece superar con creces el número de individuos que jamás podrá reconocer una persona, y plantea la pregunta de por qué la evolución dio lugar a esa capacidad aparentemente excesiva de distinguir rostros.

Terry Goldman
Laboratorio Nacional de Los Álamos
Nuevo México

Responde Tsao: *Relacionar las características de ruido de las neuronas con la capacidad para distinguir caras es una idea interesante. No estoy segura de que haya una discrepancia entre el número de estados neuralmente distinguibles y nuestra capacidad para percibirlos: como demuestra la existencia de la cirugía plástica, cada uno de nosotros puede discernir diferencias extremadamente finas en el rostro de una persona.*

Por qué nuestro cerebro evolucionó para representar caras mediante esas coordenadas es una pregunta profunda y abierta. Una posible respuesta es que la tarea fundamental del cerebro no es tanto lograr objetivos ad hoc, como distinguir las caras de las personas que conocemos, sino construir modelos eficientes del mundo. Y, en el caso del reconocimiento facial, la mejor manera de conseguirlo podría ser extraer esos parámetros para la forma y el aspecto de un rostro. Lo que sí sabemos es que, con 50 parámetros para la forma y la apariencia, somos capaces de recrear una cara.

MAGNETISMO PLANETARIO

«El exoplaneta vecino» [Investigación y Ciencia, abril de 2019], de M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane, menciona que Venus no presenta un campo magnético pero que, sin embargo, posee una atmósfera extremadamente gruesa y densa. Marte, por el contrario, prácticamente carece de atmósfera. Al respecto, la explicación que me resulta más familiar es que Marte perdió su campo magnético y que, como consecuencia, quedó expuesto al viento solar, el cual degradó su atmósfera.

Cabría pensar que Venus, al estar mucho más cerca del Sol, tendría que haber experimentado un viento solar mucho más intenso. Ambos planetas se formaron hacia la misma época, por lo que la enorme diferencia entre sus atmósferas parece desafiar el sentido común. ¿Qué estoy pasando por alto?

Chris Scholfield

Responden los autores: *La clave reside en que el campo magnético de Venus es insignificante en la época actual. Sin embargo, eso no quiere decir que lo fuera durante los últimos 4000 millones de años. Suponiendo una composición y un tamaño del núcleo similares a los de la Tierra, los modelos del campo magnético venusiano revelan que el planeta probablemente tuvo un campo parecido al terrestre hasta hace unos 1000 millones de años. Un aspecto crucial es que ello protegió su atmósfera cuando el Sol era mucho más joven y activo. Además, la atmósfera venusiana es mucho más gruesa y presenta un peso molecular medio mayor que la de la Tierra, lo que la habría hecho más resistente a la degradación solar.*

Con todo, la manera exacta en que un campo magnético puede proteger una atmósfera parece ser más compleja de lo que se pensaba hasta hace poco. Por ejemplo, varias mediciones recientes sugieren que, hoy en día, la Tierra, Marte y Venus pierden oxígeno a un ritmo similar. Este resultado es desconcertante ya que, como bien indica el lector, la masa, el campo magnético y la distancia al Sol deberían ser los principales factores que determinan la degradación de una atmósfera.

¿SOLO UN TRUCO?

En «El código oculto de las partículas» [Investigación y Ciencia, abril de 2019], Matthew von Hippel llama varias veces «truco» a la observación del matemático Alexander B. Goncharov de que la teoría matemática de los períodos puede emplearse para simplificar los cálculos en física de partículas. Sin embargo, ello implica que dichos cálculos pueden descomponerse en un «alfabeto» cuyas letras solo pueden combinarse según una gramática sencilla. Algo así parece ser algo más que un simple truco. ¿Es posible que ese alfabeto y esa gramática se correspondan con alguna estructura más profunda en la teoría de partículas?

Doug Hoover
Sunnyvale, California

Responde Von Hippel: *En efecto, tal vez los distintos «alfabetos» que aparecen en los cálculos de física de partículas tengan un significado más profundo. Los físicos sospechan que podrían guardar relación con las llamadas «ecuaciones de Landáu», un resultado obtenido hacia mediados del siglo pasado por el físico soviético y premio nóbel Lev Landáu. Sin embargo, la conexión entre ellos aún no se entiende bien.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



FÓSIL DEL GÉNERO *DICKINSONIA* datado en entre 541 y 571 millones de años de antigüedad.



PALEONTOLOGÍA

¿Cuándo empezaron a desplazarse los animales?

Los fósiles clarifican sus primeros movimientos deliberados

Hace unos 550 millones de años, los animales estaban relegados a los mares. Microbios y organismos pluricelulares simples cubrían la mayor parte del lecho marino, donde formaban una alfombra orgánica parecida a las capas de algas de los estanques. Por encima de ellos, se podían encontrar animales más grandes, como *Dickinsonia*, un género sorprendente con formas que recuerdan a platos llanos, alfombrillas de baño y monedas aplastadas.

Desde hace tiempo, los científicos especulan sobre cómo era la vida en la Tierra hace 500 millones de años, durante el período Ediacárico, y siguen encontrando más pistas con cierta asiduidad. Un estudio publicado en línea en el número de junio de *Geobiology* afirma que *Dickinsonia* pudo haber sido uno de los primeros animales complejos que se movían por sí mismos en busca de alimento. Según los expertos, este hallazgo podría ayudarnos a comprender mejor la evolución de los animales [*véase* «El auge de los animales», por Rachel A. Wood; Investigación y Ciencia, agosto de 2019].

Desde que *Dickinsonia* fue descrita por primera vez, durante la década de 1940, los científicos han debatido sobre qué tipo de organismo era realmente. «Se lo ha identificado con muy diversos organismos, desde un liquen hasta un gusano», explica Scott Evans, paleontólogo de la Universidad de California en Riverside y uno de los autores del estudio. «Hace poco hemos demostrado definitivamente que era un animal.» Basándose en las pruebas fósiles, los científicos creen que *Dickinsonia* poseía un cuerpo blando y ovalado, con múltiples secciones corporales y una superficie superior estriada. Su parte anterior y posterior eran diferentes y podía crecer hasta un metro de longitud, pero solo unos pocos milímetros de grosor.

Evans y otros investigadores de su universidad y del Museo de Australia Meridional, en Adelaida, analizaron unos 1500 fósiles de *Dickinsonia* para averiguar si estos animales podían moverse por sí mismos. «Duran-

GILBERT S. GRANT, SCIENCE SOURCE

te un tiempo se especuló sobre si eran móviles» debido a las pistas aportadas por el registro fósil, comenta Evans, «pero queríamos examinar las diferentes características de *Dickinsonia* para ver si podíamos descartar otras explicaciones posibles diferentes de la movilidad».

El registro incluye tanto fósiles del cuerpo como «pistas fósiles» (huellas de todo tipo) que dejaban atrás estos animales, y demuestra que en efecto eran móviles. Sin embargo, algunos científicos argumentaban que las corrientes de los océanos antiguos pudieron haber levantado y desplazado a estas criaturas. Otros sostenían que las pistas fósiles pudieron haberse formado a partir de especímenes que se habrían descompuesto y que luego fueron destruidos al ser enterrados por los sedimentos.

Pero Evans y su equipo averiguaron que *Dickinsonia* podía, de hecho, haberse desplazado por sí mismo: puede que decenas de metros o más durante su vida. El registro fósil muestra que estos organismos se movieron siguiendo direcciones diferentes, y, según Evans, si las corrientes oceánicas fueran las responsables de ese movimiento, todos habrían ido en la misma dirección. Tanto los fósiles corporales como las pistas fósiles revelan trayectos específicos dejados por *Dickinsonia*. Si estos hubieran sido dejados por animales descompuestos, «esperaríamos que fueran aleatorios unos respecto a otros», explica Evans. «Y el hecho de que estemos viendo caminos (para un único individuo) en una dirección preferencial, sugiere que se trata de un organismo que se propulsa por sí mismo y se mueve en una dirección relacionada con su biología interna.»

Los datos indican que *Dickinsonia* se nutría en un punto de la alfombra orgánica del lecho marino, y luego buscaba una nueva fuente de alimento; es posible que lo hiciera en escalas de tiempo relativamente cortas, durante horas o días. Algunos científicos han propuesto que estos animales se movían expandiendo y contrayendo el cuerpo mediante el empleo de músculos, y los análisis más nuevos apoyan esta idea. Evans señala que, aunque se han descubierto pruebas de la existencia de un movimiento autodirigido en animales anteriores a *Dickinsonia*, seguramente eran de menor tamaño y viajaban distancias más cortas. Y añade que «esta es la primera vez que vemos a un animal que se desplazaba hacia un nuevo lugar para alimentarse».

Otros investigadores creen que estos hallazgos ayudan a resolver en parte el debate creado sobre *Dickinsonia* y contribuyen a aclarar la imagen de la historia de la vida sobre la Tierra. «Eliminaron de un plumazo todas las demás hipótesis» sobre si *Dickinsonia* se movía o no, apunta Jakob Vinther, paleobiólogo de la Universidad de Bristol ajeno al estudio. «Esto nos marca el camino que debemos seguir para comprender qué nos cuenta este fósil sobre los primeros animales y su evolución», cree la paleontóloga y matemática Renee Hoekzema, de la Universidad de Copenhague. «Contra todo pronóstico, estamos empezando a resolver cuestiones fundamentales sobre la naturaleza de la enigmática biota ediacárica, y gracias a ello sabemos más sobre la evolución de la vida compleja», comenta Hoekzema, quien tampoco participó en el estudio.

Aunque *Dickinsonia* no se parece a ningún ser vivo actual, sí que existen algunos paralelismos entre la vida animal moderna y la de criaturas arcaicas como estas. «Estamos viendo las primeras etapas del desarrollo de comportamientos complejos de movilidad y diferentes modos de alimentación», explica Evans. «Estas comunidades animales halladas en los primeros estratos del registro fósil son casi tan complejas como las actuales.» Puede que, después de todo, la vida en la Tierra ancestral no fuera tan extraña.

—Annie Sneed

BIOLOGÍA

Un aperitivo en migración

Para los tiburones jóvenes, las aves terrestres son un blanco fácil

Cuando el biólogo pesquero James Drymon constató la presencia de plumas en el vómito de un tiburón tigre, supuso en un primer momento que pertenecían a alguna desafortunada ave marina: una gaviota, tal vez, o un pelícano. La sorpresa llegó cuando él y su equipo secuenciaron su ADN: las plumas procedían de un ave canora terrestre, el cuitlacoche rojizo. Pero ¿qué hacían en el estómago de un tiburón tigre del golfo de México?

Drymon, investigador del Centro de Extensión e Investigación Costera de la Universidad Estatal de Mississippi, y sus colaboradores examinaron entre 2010 y 2018 el contenido estomacal de 105 tiburones tigre jóvenes. Casi el 40 por ciento acababa de darse un atracón de aves que viven en tierra firme. Los científicos contaron un total de 11 especies de pájaros terrestres en el menú de los tiburones. Los resultados se publicaron en línea el pasado mes de mayo en la revista *Ecology*.



AVE CANORA hallada en el estómago de un tiburón tigre.

Desde la década de los 60 del siglo pasado se sabe que los tiburones se alimentan a veces de aves canoras. «Pero nos sorprendió la prevalencia» del comportamiento, puntualiza Drymon. «Es algo que ocurre cada año en un gran número [de tiburones].»

Cada otoño y cada primavera, las aves canoras emprenden extraordinarias migraciones a través del golfo de México. Cuando se ven acompañadas de mal tiempo, pueden verse forzadas a amerizar, lo que equivale a una sentencia de muerte. «Se calcula que el número de aves migratorias que muere por episodios de tormenta es del orden de miles de millones», explica Drymon. El investigador sospecha que los tiburones aprovechan desde hace tiempo estos nutritivos bocados que, dos veces al año, caen del cielo. Pero la confirmación ha tenido que esperar a la llegada de las herramientas genéticas, que han permitido identificar plumas en parte digeridas.

Los resultados reflejan cuán interconectados pueden estar los ecosistemas marino y terrestre, destaca Neil Hammerschlag, ecólogo marino de la Universidad de Miami que no ha participado en el estudio. «Demuestra lo oportunista y sumamente generalista que es la dieta de estos tiburones.»

—Jason G. Goldman

MARCUS DRYMON, MUSEO FIELD

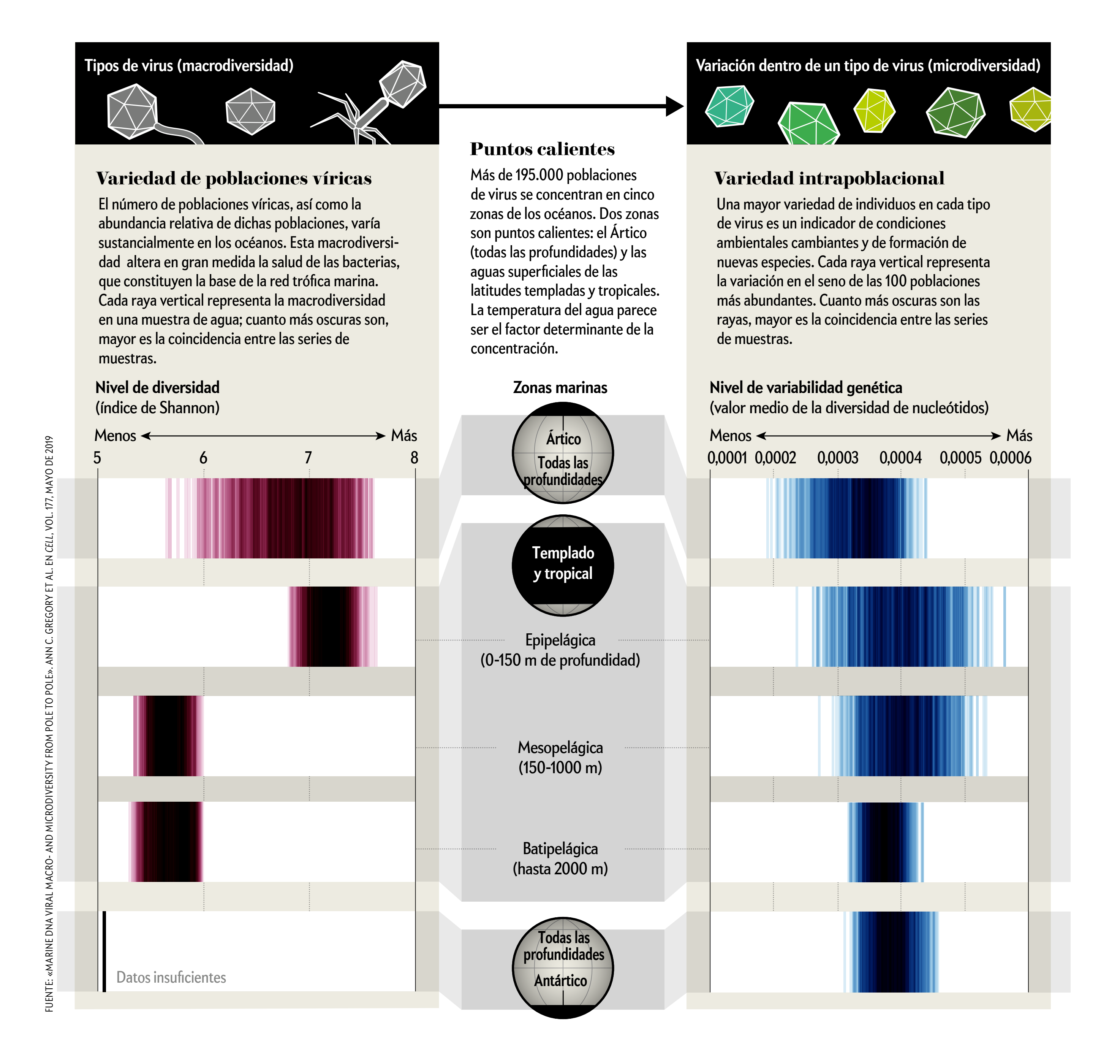
MICROBIOLOGÍA

Los virus florecen en los mares árticos

Queda refutada la suposición de que su abundancia disminuye al aumentar la latitud

A pesar de que los especialistas no disponían hasta ahora de un censo detallado de los virus en los mares, muchos suponían que su abundancia y variedad debía de disminuir del ecuador a los polos. No es el caso. Un nuevo estudio ha engrosado notablemente los datos al respecto y revela que el Ártico posee un inventario más rico que otros océanos. «Es un punto caliente de diversidad», afirma Matthew Sullivan, microbiólogo de la Universidad Estatal de Ohio y participante en el estudio. A su juicio, la razón reside en que la cuenca ártica constituye un sumidero de las aguas procedentes del Atlántico y del Pacífico, auténticas cintas transportadoras y ríos oceánicos que desaguan en ella. Otro aspecto sorprendente es que los virus se concentran en gran parte en otras cuatro zonas de los mares terrestres (*gráfica*). «Hasta ahora lo ignorábamos. Bien podrían haber sido veinte», confiesa Sullivan.

—Mark Fischetti



FUENTE: «MARINE DNA VIRAL MACRO- AND MICRODIVERSITY FROM POLE TO POLE», ANN C. GREGORY ET AL. EN *CELL*, VOL. 177, MAYO DE 2019

BOTÁNICA

Un helecho que absorbe arsénico

Los genes de esta planta nos dan una pista sobre cómo limpiar la tierra y el agua

Tanto las aguas subterráneas como las tierras contaminadas con arsénico afectan a millones de personas de todo el mundo; la sustancia puede producir lesiones cutáneas, cáncer y otras enfermedades si llega al agua destinada al consumo y a los cultivos. Pero el helecho chino, *Pteris vittata*, acumula de forma natural niveles de arsénico que matarían a la mayoría de organismos y, a pesar de ello, sigue viviendo. Desde hace mucho tiempo, el mecanismo que hay detrás de esta tolerancia constituye un auténtico rompecabezas bioquímico.

Ahora, los botánicos Jody Banks y Chao Cai, ambos de la Universidad Purdue, y sus colaboradores lo han aclarado. Y lo han hecho insertando los genes del helecho en otras plantas. Banks opina que un día los bioingenieros podrán aprovechar esta habilidad de la planta para ayudar a limpiar zonas contaminadas.

Banks ha constatado que hay tres genes de la planta que se activan más cuando esta se topa con arsénico. Para comprobar si son los responsables de la tolerancia a él, utilizó una técnica biológica habitual para desactivar cada gen en diferentes muestras (las cuales murieron cuando fueron expuestas al veneno). Después de eso, y junto a su equipo, utilizó un microscopio para lo-



EL HELECHO *Pteris vittata*.

CONDUCTA ANIMAL

¿Por qué vuelan juntas las palomas?

Aunque ello les ofrece protección frente a los depredadores, deben volar más deprisa para ganar estabilidad

Un grupo de aves batiendo al unísono sus alas es un espectáculo grandioso para el ser humano. Las aves obtienen de sus compañeras protección frente a los depredadores y ayuda en la navegación. Un nuevo estudio demuestra que las palomas pagan un precio muy alto por volar juntas, incluso en pares. Con todo, siguen haciéndolo.

Algunas aves, como los gansos, vuelan en V para ahorrar energía aprovechando las corrientes de aire creadas por sus vecinas de viaje. Pero las especies de menor tamaño, como las palomas, se agrupan en bandadas desorganizadas que carecen de este beneficio; un estudio de 2011 reveló que las palomas baten las alas incluso más rápido, es decir, realizando un mayor esfuerzo, cuando vuelan en grupos densos.

Para estudiar más de cerca este fenómeno, científicos de la Universidad de Oxford y de la Royal Holloway de la Universidad de Londres registraron la frecuencia del aleteo de las palomas y su ruta de vuelo al viajar en solitario o en pareja. Observaron que las aves batían las alas una vez más por segundo cuando iban en pares. Ello suponía un aumento de la frecuencia del 18 por ciento respecto al vuelo en solitario, además de una diferencia muy superior a la detectada entre los grupos dispersos y densos del estudio de 2011. Sin embargo, la mayoría de parejas se mantuvieron juntas. El nuevo estudio se publicó en junio en la revista *PLOS Biology*.

Los autores del estudio plantean que, en su intento por seguir juntas, las aves baten más rápido sus alas para mejorar el control y la estabilidad visual. «Lo cierto es que vuelan a gran velocidad», explica la autora principal

JODY BANKS, UNIVERSIDAD PURDUE (*helecho*); HUGH MACKINTOSH, GETTY IMAGES (*palomas*)

calizar las proteínas que codifican estos genes en el helecho, y reconstruyeron cómo operan juntas para recoger y neutralizar el arsénico cuando este se distribuye por las hojas.

Una de las proteínas, GAPC1, se halla en la mayoría de los organismos y utiliza fosfato para ayudarles a romper los azúcares y obtener energía. El arsenato, la forma de arsénico que se encuentra en el suelo, es tóxico porque reemplaza al fosfato en este proceso e impide así la producción de energía. Pero, en el helecho, la GAPC1 tiene una estructura ligeramente diferente que le permite unirse químicamente al arsenato. Otra proteína llamada OCT4, codificada por uno de los otros genes, ayuda a transportar el arsenato a través de las membranas y a introducirlo en unas estructuras diminutas celulares llamadas vacuolas. En el interior de estas, la proteína GST (codificada por el tercer gen) transforma el arsenato en una forma llamada arsenito. Los investigadores han descubierto que las vacuolas transfieren este compuesto a partes de la planta en las que se acumula de forma segura como defensa contra insectos hambrientos. Su estudio se publicó en mayo en *Current Biology*.

En 2016, el bioquímico Barry Rosen, de la Universidad Internacional de Florida, que no participó en el estudio, identificó un proceso mediante el que se secuestraba y neutralizaba el veneno en una especie bacteriana tolerante al arsénico, *Pseudomonas aeruginosa*, que utilizaba genes casi idénticos. Mientras que el helecho atrapa arsenito en células especializadas, la bacteria lo devuelve al entorno. «La constatación de que este mecanismo tan novedoso sirve a la vez a plantas y bacterias», comenta Rosen, «demuestra que los organismos han desarrollado un modo de evitar ese arsenato tóxico».

—*Rachel Berkowitz*

Lucy Taylor. «Vuelan muy rápido y sin chocarse con nada, lo cual es sin duda una gran proeza.» Los dispositivos de seguimiento de las palomas indican que las mayores frecuencias de aleteo les proporcionaron mayor estabilidad, aunque Bret Tobalske, de la Universidad de Montana, opina que se necesita una medición más directa (como la que ofrece una cámara sujeta a la cabeza del ave) para poder hallar una respuesta definitiva. «Es una investigación novedosa e importante que parte de estudios previos», explica Tobalske, que investiga el vuelo de las aves y no participó en ninguno de los dos estudios.

Taylor cree que el mayor gasto energético que entraña pasar de volar en pareja a volar en bandada será mucho menor que el que requiere dejar de volar en solitario para hacerlo en pares, ya que, al fin y al cabo, los nuevos pormenores de agruparse nacen del hecho de viajar en pareja. «Hay que coordinarse con otro», comenta. «A mayor número de aves, mayor será la necesidad de coordinación.» Aun así, Taylor opina que el experimento debería ampliarse para examinar qué cambios se producen a medida que la bandada aumenta en número.

Con todo, emparejarse también aporta beneficios. Los investigadores descubrieron que las rutas de las palomas eran más directas cuando viajaban en pares. Además, cada miembro de la pareja logra percibir mejor la cercanía de un depredador, y tiene una oportunidad de que la elegida por él sea su compañera.

Las palomas aceptan el precio energético de estos beneficios porque, como bien dice Tobalske, «nada es gratis en esta vida».

—*Leila Sloman*

SHANE KING Y MAURA EVELD, UNIVERSIDAD VANDERBILT

BIOMECÁNICA

Caer por la ciencia

Una traicionera cinta de correr provoca traspiés para estudiar el equilibrio

Uno de los participantes del estudio camina con paso enérgico sobre una cinta de correr. Las cámaras de vídeo van registrando cada uno de sus movimientos cuando, de repente, aparece en su camino un bloque de metal de 16 kilogramos. Unas gafas especiales le impiden verlo y tropieza, tambaleándose hacia adelante hasta que lo retiene un arnés de seguridad. Se ha producido una caída, pero aún faltan decenas de ellas.

Un grupo de investigadores ha desarrollado esta traicionera cinta de correr para estudiar cómo recuperamos el equilibrio después de tropezar. Hasta ahora se sabía que, para conseguirlo, solemos dar un paso exageradamente grande, lo que permite que el sistema nervioso central reoriente el centro de gravedad del cuerpo sobre un apoyo estable, explica Michael Goldfarb, ingeniero mecánico de la Universidad Vanderbilt y coautor del estudio. Sin embargo, «la forma en que lo hacemos depende de la configuración que tuviera nuestro cuerpo en el momento de tropezar», añade el experto.

Las personas con piernas protésicas a menudo experimentan dificultades para recuperarse de los traspiés y, como consecuencia, caen con mucha más frecuencia que la población general. Entender cómo tropiezan y se recuperan quienes se apoyan sobre las dos piernas podría ayudar a los investigadores a diseñar mejores prótesis.

Para provocar un auténtico tropezón, los investigadores debían interponer los pesados bloques de manera sorpresiva. El aparato de Goldfarb y sus colaboradores, descrito en junio en *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, funciona porque es capaz de colocar un bloque pesado sobre la cinta de correr con tanta delicadeza que los participantes no lo perciben hasta que ya han trastabillado. Un algoritmo determina dónde colocar el bloque para que los investigadores puedan observar la respuesta a los traspiés en las diferentes fases de la marcha de una persona.

La sorpresa es un elemento clave. No obstante, según señala Mark Grabiner, biomecánico de la Universidad de Illinois que no participó en el trabajo, los participantes de este tipo de estudios suelen saber que tarde o temprano tropezarán, lo que puede alterar los resultados. En el pasado, este problema se ha abordado de distintas maneras, en ocasiones llegando a ocultar a los sujetos que estaban tomado parte en un ensayo de pérdida del equilibrio. El diseño subrepticio del nuevo trabajo representa «una mejora con respecto a las tecnologías existentes», opina el experto.

Goldfarb adelanta que, en la siguiente fase del estudio, su equipo usará los datos de los traspiés para programar en las extremidades protésicas respuestas reflejas a distintos tipos de trompicones.

—*Jim Daley*



LOS INVESTIGADORES lograron provocar 190 traspiés.

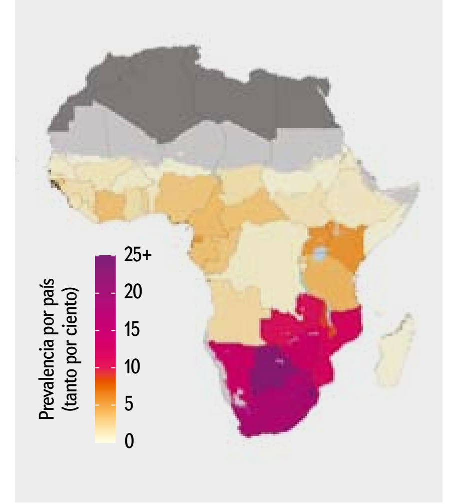
SALUD PÚBLICA

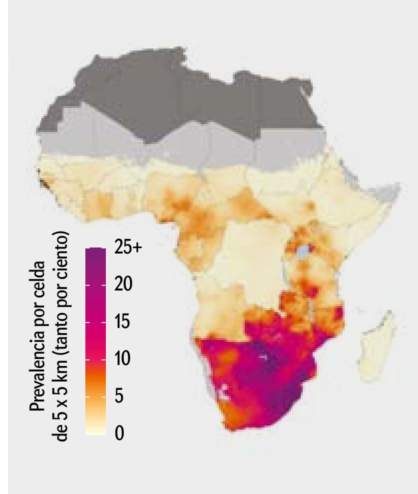
Distribución geográfica del VIH

Hacia una imagen más detallada de la prevalencia del virus en África

El VIH y el sida son la primera causa de muerte en el África subsahariana. Ya no es una sentencia de muerte gracias al tratamiento antirretrovírico de por vida, pero conseguir que este llegue a todos los pacientes es un reto. Ahora, se ha llevado a cabo uno de los análisis más específicos geográficamente para conocer con exactitud la prevalencia del VIH en 47 países subsaharianos. El estudio puede ayudar a las autoridades a mejorar el tratamiento y los esfuerzos dedicados a su prevención.

«Esperemos que les sirva a aquellos que trabajan sobre el terreno en una zona particular y se añada a lo que ya saben sobre su comunidad», explica la autora principal, Laura Dwyer-Lindgren, profesora de la Universidad de Washington. «También esperamos que sea útil de una forma más centralizada, a escala nacional, para detectar lugares en los que el número de personas necesitadas no





PREVALENCIA DEL VIH en adultos de edades comprendidas entre 15 y 49 años en 2017, a nivel de país (*izquierda*) y a nivel de cuadrícula de 5 × 5 kilómetros (*derecha*). Este último muestra una imagen más granulada de la proporción de la población que convive con el virus.

TECNOLOGÍA

Lienzos microscópicos

Logran generar coloridos retratos a partir de microestructuras de plástico

Durante milenios, la humanidad ha creado sus obras de arte con pinturas basadas en pigmentos y tintes. Ahora, un grupo de investigadores ha conseguido producir diminutos cuadros de plástico cuyos colores obedecen a un principio muy distinto: las variaciones en las características microscópicas de la superficie.

Un pigmento es una sustancia que absorbe ciertas longitudes de onda de la luz y refleja otras. Sin embargo, algunos materiales, como los que recubren las iridiscentes alas azules de las mariposas del género *Morpho* o las llamativas plumas de algunos colibríes, producen los colores a partir del tamaño y la separación de pequeñas estructuras en su superficie, cada una de las cuales interacciona con diferentes longitudes de onda de la luz.



Numerosos plásticos desarrollan grietas minúsculas, o pseudomicrofisuras, al someterlos a tensión. Aunque estas fracturas suelen aparecer en lugares aleatorios del material, algunos plásticos pueden debilitarse de manera selectiva haciendo incidir haces de luz allí donde se desea que surjan las microfisuras al aplicar la tensión. «Eso nos permite controlar dónde se formarán las grietas», explica Andrew Gibbons, coautor del nuevo estudio y científico de materiales de la Universidad de Kyoto. Dependiendo de su tamaño y configuración, dichas grietas actúan como microestructuras que producen colores concretos.

Gibbons y sus colaboradores enfocaron potentes ledes sobre piezas delgadas de plástico y luego las sumergieron en ácido acético, lo que generó microfisuras en los puntos previamente debilitados por la luz. Según el estudio, publicado en *Nature* el pasado mes de junio, las grietas reflejaban la longitud de onda de la luz que incidió sobre esa parte del plástico.

Con todo, si el plástico se sumerge durante más tiempo o si se somete a altas temperaturas, las grietas pueden crecer y reflejar longitudes de onda mayores. El tamaño de la región expuesta a la luz y el grosor del plástico contribuyen a determinar hasta dónde se expanden las grietas. Para poner a prueba su método, los investigadores crearon reproducciones diminutas de cuadros famosos e incluso de la portada de un álbum de Queen. La más pequeña medía 0,25 milímetros de ancho.

«Se trata de un enfoque innovador», sostiene el científico de polímeros Christopher Soles, del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU., que no participó en el estudio. «Por lo general, que se agriete un material es algo muy negativo, pero aquí las microfisuras resultan útiles», señala Soles. Al investigador le sorprendió que el proceso funcionara con tantos tipos de plásticos, in-

DE «MAPPING HIV PREVALENCE IN SUB-SAHARAN AFRICA BETWEEN 2000 AND 2017», POR LAURA DWYER-LINDGREN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 570, 2019 (*mapas*); ANDREW GIBBONS (*microestructura de plástico*)

se corresponde con los recursos dedicados.»

Dwyer-Lindgren y sus colaboradores han creado una base de datos sobre la prevalencia del VIH basándose en las encuestas de población y en los datos recogidos en las clínicas a las que acuden las mujeres en busca de cuidados prenatales. Utilizaron estos datos para calcular la proporción de personas (de 15 a 49 años) con VIH entre el 2000 y el 2017 en matrices geográficas de cinco por cinco kilómetros (*véase el gráfico adjunto*), al igual que el número de personas que conviven con el virus.

La prevalencia del VIH varía ampliamente de país a país: en 2017, varió del 15 por ciento, en el distrito Ghanzi de Botsuana, al 28 por ciento, en su distrito nordeste. La prevalencia también se redujo en algunas zonas, como el distrito de Manica en Mozambique, y aumentó en otros, como en su distrito de Guijá.

Este nivel de granularidad estadística es útil para dirigir con más precisión los tratamientos y la prevención. «Es un gran estudio en el que se resumen los datos de los años en los que hemos luchado contra esta enfermedad», afirma Aysha Kharsany, investigadora principal del Centro para el Programa de Investigación del Sida en Sudáfrica, que no participó en el nuevo estudio. «Hemos tenido mucho éxito asegurándonos de que la gente continúa con su tratamiento», dice, pero «necesitamos asegurarnos de que el tratamiento se amplía y se dirige a las zonas que más lo necesitan».

La disponibilidad de una cartografía a este nivel es «muy excitante», añade Sten Vermund, decano de la Facultad de Salud Pública de Yale. Piensa que la Organización Mundial de la Salud y el Programa Conjunto de las Naciones Unidas sobre el VIH/SIDA deberían adoptar esa metodología para realizar sus propios informes.

Los incrementos en la prevalencia no constituyen necesariamente una prueba de nuevos casos de VIH; las personas que tienen el virus pueden vivir más tiempo o mudarse a diferentes zonas, y el siguiente paso que tenemos que dar es obtener mejores cálculos de nuevos casos. Pero «también se hace evidente que numerosas personas no están recibiendo tratamiento», afirma Dwyer-Lindgren. «Todavía queda mucho trabajo por hacer.» —*Tanya Lewis*

---

cluidos el poliestireno, el policarbonato y el metacrilato, materiales que habitualmente se emplean para fabricar envases de yogur, discos compactos y cristales a prueba de balas, respectivamente.

Gibbons sostiene que las microfisuras podrían servir para crear un revestimiento plástico duradero para billetes o productos de alta gama, lo que dificultaría las falsificaciones. Y las microestructuras no solo producen imágenes atractivas. El científico espera que, con el tiempo, la técnica pueda emplearse para fabricar dispositivos para análisis médicos capaces de almacenar cantidades microscópicas de líquido.

—*Jennifer Leman*



LA JOVEN DE LA PERLA, de Johannes Vermeer, recreada en poliestireno.

ANDREW GIBBONS (*microestructura de plástico*); PRBB (*Leonardo da Vinci*)

AGENDA

CONFERENCIAS

16 de septiembre
Cripto viene de criptografía: Criptomonedas y criptofundamentos de *blockchain*
Luis Hernández Encinas, CSIC
Patio de la Infanta
Zaragoza
www.csic.es

EXPOSICIONES

Hasta el 13 de septiembre
Ángel del Campo: Químico complutense
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Complutense
Madrid
https://biblioteca.ucm.es/qui/angel-del-campo-quimico-complutense

Leonardo da Vinci en el Parque de Investigación Biomédica de Barcelona
Metro Ciutadella/Vila Olímpica
Barcelona
ellipse.prbb.org



OTROS

11 de septiembre — Mesa redonda
Transición energética en España: ¿Seguidores o líderes?
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

Hasta el 15 de septiembre — Concurso
Brain Wars
Concurso de divulgación para estudiantes de grado, máster y doctorado
Colabora: Real Sociedad Española de Química
rseq.org

Del 19 al 22 de septiembre — Jornadas
Naukas Bilbao 2019
Charlas y talleres
Palacio Euskalduna
Bilbao
naukas.com

27 de septiembre — Jornada
Noche europea de los investigadores
Distintas actividades en numerosas ciudades españolas
lanochedelosinvestigadores.es

NUTRICIÓN

¿Es beneficioso el consumo de soja para la salud?

Su diferente efecto en las personas puede atribuirse en gran parte a las variaciones en la microbiota intestinal

ÁNGELA PEIROTÉN Y JOSÉ M.ª LANDETE



LA SOJA y los productos derivados de ella son ricos en isoflavonas, unos compuestos a los que se atribuyen propiedades terapéuticas.

Desde hace tiempo, numerosos estudios han aportado pruebas de que el consumo de alimentos derivados de la soja resulta ventajoso para la salud humana: reduce la incidencia de las enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer y mitiga los síntomas de la menopausia. Los beneficios se atribuyen principalmente a la acción de las isoflavonas, unos compuestos muy abundantes en la soja con propiedades antioxidantes y actividad estrogénica (similar a la de los estrógenos humanos).

Sin embargo, mientras que los efectos positivos de las isoflavonas se han demostrado de forma clara en el laboratorio, las pruebas obtenidas a partir de estudios epidemiológicos y ensayos clínicos en humanos han resultado menos sólidas, mostrando a veces efectos contradictorios. Esta falta de datos concluyentes hace que surjan dudas sobre la efectividad de la soja como un alimento que mejora la salud.

En un artículo de revisión reciente publicado en la revista *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* hemos analizado las posibles causas de esa disparidad de resultados. Las principales preguntas que hemos abordado han sido: ¿en qué aspectos de la salud humana pueden influir las isoflavonas de la soja? ¿Cuándo y cómo ejercen un efecto beneficioso?

En el laboratorio

Las propiedades biológicas de las isoflavonas se atribuyen en gran parte a su similitud estructural con los estrógenos humanos, por lo que han sido clasificadas como fitoestrógenos. Los estrógenos son hormonas sexuales que ejercen sus efectos en el organismo a través de los receptores estrogénicos, los cuales se hallan en la membrana de las células de la mayoría de nuestros tejidos y órganos. Tales receptores son de diferentes tipos y, según las moléculas que se unan a ellos, influyen de distinta manera en el metabolismo de las células.

Cuando las isoflavonas interaccionan con los receptores estrogénicos pueden tener el efecto de «estrógenos débiles», ya que se unen con menos afinidad que los estrógenos humanos propios; o pueden actuar como «antiestrógenos» al competir con el estrógeno circulante. Esto da lugar a un abanico de efectos de distinta intensidad. Así, durante la menopausia, las isoflavonas pueden imitar en cierta medida el efecto de los estrógenos que han dejado de producirse y pueden aliviar algunos síntomas, como los sofocos. Del mismo modo, las isoflavonas suplen la protección que los estrógenos ejercían

frente a la enfermedad coronaria, por lo que representan una alternativa muy interesante a la terapia de reemplazo hormonal. Por otro lado, durante la edad fértil de la mujer, las isoflavonas pueden mostrar propiedades preventivas frente al cáncer de mama, al reducir la acción proliferativa que tienen los estrógenos sobre las células.

Además, las isoflavonas pueden ofrecer protección a toda la población frente a las enfermedades cardiovasculares. Gracias a su capacidad antioxidante ayudan a prevenir la aterosclerosis (el estrechamiento de las arterias por la acumulación en sus paredes de depósitos lipídicos). Así lo hacen pensar los efectos hipocolesterolemiantes descritos, entre ellos el incremento de la actividad de los receptores LDL (los responsables de fijar el colesterol «malo») y la reducción de la absorción global de colesterol en el intestino.

El efecto de las isoflavonas sobre el cáncer también podría ir más allá del cáncer de mama, ya que son capaces de inhibir ciertas enzimas y genes implicados en la activación y proliferación de diferentes tipos de cáncer.

Todas las propiedades atribuidas a las isoflavonas, entre las que destacan las estrogénicas o antiestrogénicas y las antioxidantes, han sido demostradas in vitro. Sin embargo, los estudios en poblaciones humanas, tanto los epidemiológicos como los clínicos, muestran resultados desiguales. Mientras que en la población asiática el consumo de soja se relaciona con efectos beneficiosos sobre la salud, en la occidental no siempre se observa dicha relación.

La falta de resultados positivos en la población occidental puede deberse a diferentes factores. La presencia de soja y, por tanto, de isoflavonas en la dieta occidental es muy baja (1 miligramo al día) comparada con la asiática (50 miligramos al día), por lo que será difícil que se alcancen los niveles necesarios para que se observe algún beneficio. Además, es importante tener en cuenta que las isoflavonas no se hallan en su forma bioactiva en la soja, sino que necesitan ser transformadas por la comunidad microbiana, o microbiota, del intestino para poder ser absorbidas y ejercer su efecto en todo el organismo.

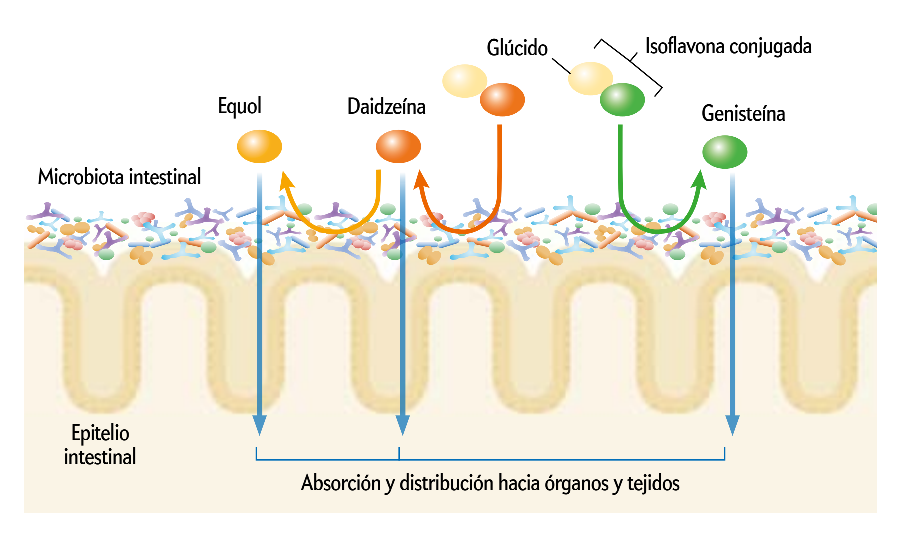
El papel de la microbiota

¿Qué función desempeñan los microorganismos intestinales en el metabolismo de las isoflavonas? En el alimento estas sustancias se hallan conjugadas con glúcidos, con los que forman moléculas muy voluminosas que el sistema digestivo es incapaz de absorber. Cuando las isoflavonas llegan al intestino, las bacterias comensales presentes en él comienzan a transformarlas en otros compuestos. Entre ellos destacan la genisteína, la daidzeína y el equol. Las dos primeras son producidas en el intestino de la mayoría de las personas, si bien con cantidades que varían entre individuos. El equol se deriva de la daidzeína y requiere un mayor número de reacciones que las dos primeras. Aunque presenta una mayor bioactividad que ellas, no es sintetizado en todas las personas. Así, mientras que los productores de equol son en torno al 60 por ciento de la población asiática, en la europea solo lo son el 30 por ciento.

La reducida ingesta de alimentos ricos en isoflavonas y la baja incidencia en la población occidental de bacterias capaces de producir equol podrían ser responsables en parte de la dificultad para demostrar los efectos beneficiosos del consumo de soja en la población occidental. Si bien una ingesta mayor y continuada de alimentos derivados de la soja incrementaría los niveles de los metabolitos bioactivos de las isoflavonas, como la daidzeína y la genisteína, este consumo no aseguraría unos efectos positivos en todos los individuos debido a que su síntesis no es uniforme en la población; y aún lo es menos la del equol, que solo se formará en los individuos que porten las bacterias adecuadas.

A la luz de las pruebas disponibles en la actualidad, podemos afirmar que consumir una dieta rica en isoflavonas está relacionada con distintos beneficios para la salud, especialmente en las mujeres posmenopáusicas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la microbiota intestinal, además del tipo de alimentación de cada individuo, influirá de modo importante en esos beneficios.

A este respecto se ha abierto una vía interesante en el desarrollo de alimentos que incorporan cepas bacterianas capaces de producir isoflavonas bioactivas. En nuestro departamento hemos identificado cepas de bacterias lácticas y bifidobacterias que sintetizan la daidzeína, la genisteína y metabolitos derivados de ellas que son precursores del equol. Estos últimos podrían facilitar la producción de equol en las personas que carecen de las bacterias adecuadas e incrementar la de las personas que sí las albergan. También hemos identificado bacterias lácticas capaces de producir metabolitos derivados de la daidzeína y la genisteína que no son precursores del equol, como la *O*-desmetilangolesina (*O*-DMA) y su derivado hidroxilado (6-OH-*O*-DMA), los cuales podrían tener efectos positivos en la salud. Dada la seguridad que ha demostrado con anterioridad el uso de las bacterias lácticas y bifidobacterias en la alimentación, consideramos que estas bacterias productoras de isoflavonas



LAS ISOFLAVONAS DE LOS ALIMENTOS son moléculas que suelen hallarse conjugadas con un glúcido, por lo que no pueden ser absorbidas por el intestino. La microbiota intestinal transforma las isoflavonas en formas más sencillas, como la daidzeína, la genisteína y el equol, que sí pueden ser absorbidas. De la diferente composición de la microbiota de las personas dependerá esa transformación y el posterior efecto de las isoflavonas en el organismo.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

bioactivas son buenas candidatas para su incorporación en alimentos derivados de la soja y también para su utilización como probióticos.

Ángela Peirotén *es técnica de investigación del Departamento de Tecnología de Alimentos del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, en Madrid.*
José M.ª Landete, *doctor en ciencias biológicas, es científico titular del mencionado departamento.*

PARA SABER MÁS

Bioactivation of phytoestrogens: Intestinal bacteria and health. José M. Landete et al. en *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 56, págs. 1826-1843, junio de 2016.
The potential health effects of dietary phytoestrogens. I. M. C. M. Rietjens, J. Louisse, y K. Beekmann en *British Journal of Pharmacology*, vol. 174, págs. 1263-1280, mayo de 2017.
Association of isoflavone biomarkers with risk of chronic disease and mortality: a systematic review and meta-analysis of observational studies. J. Rienks, J. Barbaresko y U. Nothlings en *Nutrition Reviews*, vol. 75, págs. 616-641, agosto de 2017.
Bacterial metabolism as responsible of beneficial effects of phytoestrogens on human health. Ángela Peirotén, Daniel Bravo y José M. Landete en *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. DOI 10.1080/10408398.2019.1622505, junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

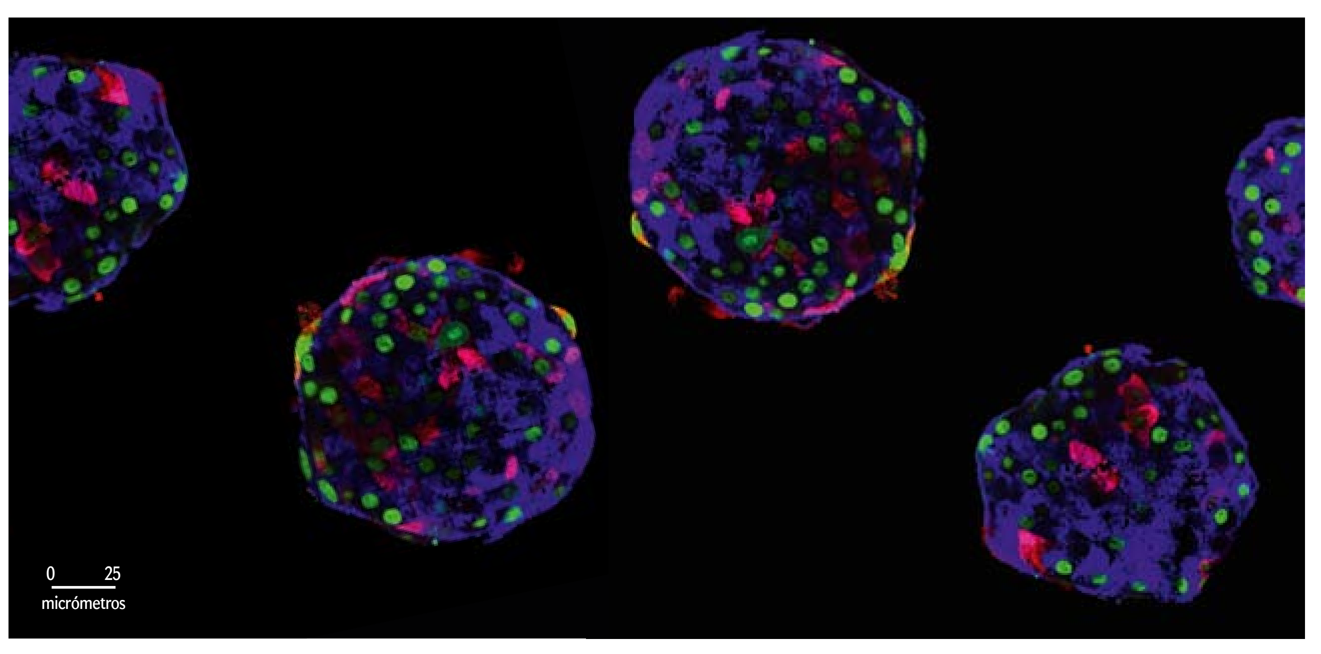
El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
La malnutrición favorece el desarrollo de bacterias nocivas. Ana Izcue y Fiona Powrie en *IyC*, mayo de 2013.

MEDICINA REGENERATIVA

Inducir la producción de insulina en la diabetes

En el laboratorio, se ha logrado cambiar la identidad de células del páncreas humano que no producen esta hormona para que sí lo hagan

PEDRO LUIS HERRERA



MICROGRAFÍA CORTESÍA DEL DR. KENICHIRO FURUYAMA, DEPARTAMENTO DE MEDICINA GENÉTICA Y DESARROLLO, FACULTAD DE MEDICINA, UNIVERSIDAD DE GINEBRA

LAS CÉLULAS α HUMANAS DEL PÁNCREAS, aquí agregadas en pseudoislotes, producen de forma natural la hormona glucagón (*azul*), pero cuando se las fuerza a cambiar de identidad, un tercio de ellas «aprende» a fabricar insulina (*rojo*). La proteína GFP (*verde*) permite trazar el origen de las células y verificar el cambio.

Las enfermedades degenerativas se deben a la pérdida prematura y masiva de un determinado tipo de célula en un órgano. El proceso de muerte celular puede ser rápido y de corta duración, como en un infarto de miocardio, o bien desarrollarse de forma crónica durante un período más o menos largo, como en la enfermedad de Párkinson o la diabetes.

La diabetes engloba a un conjunto de enfermedades cuyos síntomas son la producción excesiva de orina (poliuria) asociada a una sed insaciable (polidipsia). En un grupo de ellas, denominadas genéricamente diabetes mellitus, la poliuria y la polidipsia se deben a una acumulación excesiva de azúcar (glucosa) en la sangre. La glucosa es el carburante universal de nuestras células y se obtiene mediante la digestión de los alimentos ingeridos, por lo que sus niveles en la sangre aumentan después de las comidas. Pero para que la glucosa sea captada por las células tie-

ne que haber insulina, una hormona del páncreas que funciona como una llave de acceso. La muerte de las células pancreáticas que producen insulina, o la pérdida de la sensibilidad a la acción de esta hormona en los músculos y el hígado, dan lugar a la diabetes mellitus, una dolencia con una gran prevalencia mundial.

En la actualidad, los pacientes diabéticos dependen de las inyecciones de insulina para mantener bajo control el nivel de azúcar en sangre. Pero desde hace algún tiempo se está investigando otra opción para tratar la enfermedad: puesto que todas las formas de diabetes son enfermedades degenerativas, podrían mitigarse o curarse mediante terapias celulares que reconstituyeran la población de células secretoras de insulina.

Un estudio reciente realizado por nuestro laboratorio demuestra la facilidad de algunas células pancreáticas humanas para «aprender» a producir insulina. Este tipo de conversión, o cambio de identidad o función celular, podría compensar, en la diabetes, la pérdida o disfunción de las células que producen naturalmente esta hormona.

Terapias celulares

La idea de tratar las enfermedades degenerativas mediante una estrategia de medicina regenerativa se implantó con fuerza hace ya varias décadas. Uno de los primeros pilares de esta disciplina fueron las terapias de reemplazo celular, también conocidas como terapias celulares. El concepto se basaba en autotrasplantar (para no provocar rechazo inmunitario) células diferenciadas a partir de células madre obtenidas de embriones precoces (blastocistos), los cuales se habrían clonado a partir del ovocito de un donante y células somáticas del propio paciente.

Pero la clonación terapéutica de embriones plantea problemas éticos obvios. Sin embargo, en 2006 un importante hito proporcionó un vigor renovado al enfoque terapéutico del autotrasplante de células de reemplazo sin necesidad de emplear embriones. Kazutoshi Takahashi y Shinya Yamanaka desarrollaron en 2006 un método para obtener células madre con características pluripotenciales a partir de células adultas «desdiferenciadas» mediante un proceso sencillo de reprogramación celular. Las células madre pluripotenciales pueden cultivarse en el laboratorio y, mediante la puesta a punto de los protocolos de diferenciación adecuados, generar todos los tipos celulares que forman el cuerpo.

Otro pilar sobre el que se sustenta la medicina regenerativa es la estimulación de la capacidad intrínseca de regeneración tisular de nuestro cuerpo. Se sabe desde hace tiempo que hay órganos, como la médula ósea o el epitelio intestinal, en los que residen células madre. Se las conoce como células multipotentes: están indiferenciadas y tienen la capacidad de proliferar y reponer, en esos órganos específicos, las células que se pierden de forma natural y constante en ellos.

Los libros de texto de biología nos enseñan que las células, una vez diferenciadas y funcionales (es decir, maduras) permanecen fijas en la identidad que han adquirido, de forma irreversible. Sin embargo, en los últimos años, una serie de estudios han puesto de manifiesto que las células adultas, diferenciadas y altamente especializadas, pueden cambiar de función para adaptarse a ciertos estímulos o agresiones. Dicho de otro modo: la identidad celular no es algo «grabado en piedra».

Plasticidad celular

Pero ¿hasta qué punto las células adultas pueden cambiar de función o de identidad? ¿Qué sabemos hoy en día de esta plasticidad celular? Son cuestiones relevantes, puesto que la confirmación del descubrimiento de una plasticidad celular generalizada evocaría la posibilidad de que nuestras propias células maduras se convirtieran en los artífices de terapias innovadoras futuras de reemplazo celular, probablemente en cualquier órgano.

El páncreas endocrino se compone de varios tipos celulares: alfa (α), beta (β), gamma (γ), delta (δ) y épsilon (ε), cuya función es producir diferentes hormonas (glucagón, insulina, polipéptido pancreático, somatostatina y grelina, respectivamente). Estas células se aglomeran dentro del páncreas en grupos llamados islotes pancreáticos, o de Langerhans, y son responsables, en conjunto, de regular los niveles sanguíneos de glucosa.

Hace unos años, en nuestro laboratorio de la Universidad de Ginebra observamos que el páncreas de ratones adultos diabéticos, carentes de células β (las productoras de insulina), tenía la capacidad natural de regenerar estas células. Tal observación fue una sorpresa en sí misma, pero nuestro asombro no hizo sino aumentar cuando descubrimos que las células en cuestión correspondían en realidad a células productoras de otras hormonas pancreáticas. En concreto, las células α y δ , encargadas de sintetizar glucagón y somatostatina, comenzaron a producir insulina en respuesta a la desaparición de las células β. En los ratones diabéticos, una pequeña proporción (entre el 1 y el 2 por ciento) de las células de los islotes que no son β inician la producción de insulina de forma espontánea y estable. La capacidad natural de adaptación o «reprogramación» (entendida esta como un cambio de identidad celular) de las células funcionales maduras del páncreas endocrino demostraba una plasticidad adaptativa totalmente inesperada.

Análisis posteriores nos permitieron descubrir que la insulina misma, entre otras señales aún por determinar, actúa localmente en los islotes como un freno constitutivo que restringe la plasticidad de las células distintas de las β. Concluimos así que, el mantenimiento de la identidad celular, no solo en los islotes sino en cualquier órgano, no es consecuencia de un estado pasivo o intrínseco de las células adultas, sino un proceso activo modulado por ciertas señales locales que reprimen la tendencia natural de las células diferenciadas a cambiar de identidad.

En los humanos

¿Y qué ocurre en el páncreas humano? ¿Conservan nuestras células la misma plasticidad? ¿Sería posible promover una conversión celular con fines terapéuticos?

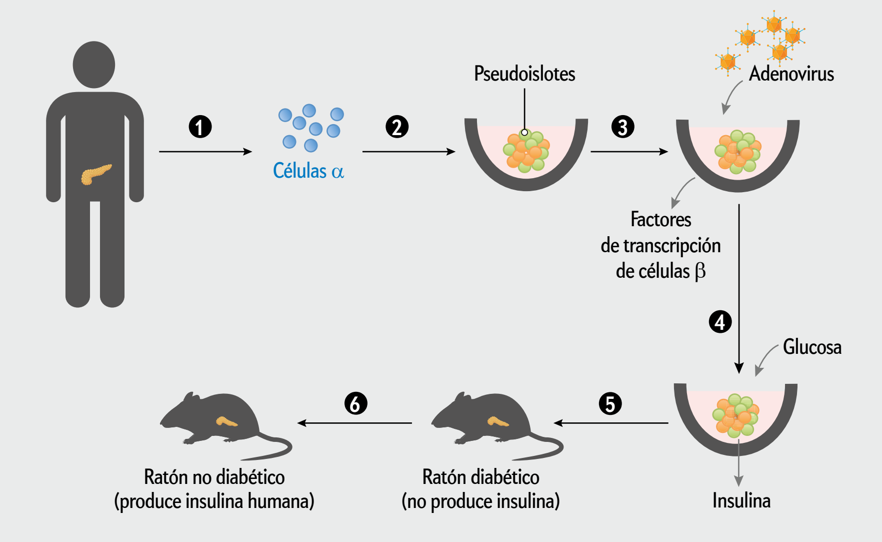
En un estudio reciente llevado a cabo en nuestro laboratorio, hemos investigado si las células del páncreas humano distintas de las β pueden adaptarse de la misma manera que lo hacen las de ratón. En primer lugar, aislamos y purificamos las células de islotes obtenidos de pacientes con diabetes mellitus y de donantes sanos, y nos centramos en dos tipos de células: las α y las γ.

Sabíamos que, en los ratones diabéticos, la desaparición de las células β daba lugar, en las células α, a la activación natural de la expresión de genes que son específicos de las células β, como los que codifican los factores de transcripción PDX1 y MAFA. Así pues, decidimos forzar la expresión de estos factores en células α y γ humanas. Para poder identificarlas y seguirles la pista en el laboratorio, marcamos las células con una proteína fluorescente. Después indujimos su agregación para que formaran islotes artificiales de un solo tipo celular (monotípicos α o γ), que bautizamos «pseudoislotes».

Nuestra primera sorpresa vino al constatar que la mera agregación celular estimulaba la expresión de ciertos genes

CAMBIO DE IDENTIDAD CELULAR

EL PÁNCREAS DE LAS PERSONAS con diabetes de tipo 1 carece de células β, las productoras de insulina. Ahora es posible modificar de forma experimental otras células del páncreas, como las α, para que adopten parcialmente la identidad y la función de las células β. Cuando se introducen estas células modificadas en ratones de experimentación diabéticos, los animales dejan de manifestar la enfermedad.



1. Se aíslan las células α del páncreas de una persona.
2. Se induce la agregación de las células α para que formen pseudoislotes.
3. Mediante adenovirus se fuerza que las células α produzcan los factores de transcripción PDX1 y MAFA, propios de las células β.
4. Ante la presencia de glucosa los pseudoislotes α segregan insulina.
5. Se trasplantan los pseudoislotes α humanos al páncreas de ratones diabéticos.
6. Los ratones producen insulina y los síntomas de la diabetes desaparecen.

vinculados con la producción de insulina. La segunda la tuvimos al comprobar que la producción de PDX1 y MAFA en las células α o γ de los pseudoislotes es suficiente como para que, al cabo de una semana solamente, un tercio de ellas comenzara a segregar insulina en respuesta a la glucosa. En los experimentos que siguieron, decidimos centrarnos en la utilización de pseudoislotes α únicamente, y resolvimos trasplantarlos en ratones diabéticos, que mostraron rápidamente una remisión de los síntomas de la enfermedad. Los pseudoislotes trasplantados eran, pues, funcionales y continuaban segregando insulina de forma regulada transcurridos seis meses, lo que revelaba que las células α productoras de insulina presentaban características funcionales estables.

En la diabetes autoinmunitaria, conocida como diabetes de tipo 1, se produce una destrucción de las células β por parte del propio sistema inmunitario. En nuestro estudio, el análisis detallado de la expresión génica y de las proteínas de las células α humanas productoras de insulina reveló que conservaban muchas características típicas de las células α iniciales. El cambio de identidad que habíamos inducido era, pues, parcial. Pensamos entonces en la posibilidad de que estas células α modificadas, con características híbridas, tal vez sean menos inmunogénicas (menos propensas a ser destruidas por el sistema inmunitario) en situaciones de autoinmunidad, ya que se mantienen diferentes de las células β nativas. Los cocultivos que realizamos en ensayos con linfocitos T citotóxicos «anti-β» (de pacientes con diabetes autoinmunitaria) sugirieron que ese es efectivamente el caso.

En conclusión, estos resultados aportan la prueba conceptual de que las células de los islotes humanos tienen una capacidad de adaptación a condiciones desfavorables, una posibilidad que, hasta ahora, era totalmente insospechada. Por otra parte, no hay ninguna razón para pensar que esta capacidad plástica se limite al páncreas, y es probable que se presente también en otros órganos. El descubrimiento de la plasticidad de las células maduras, altamente especializadas, se encuentra todavía en una fase experimental inicial y, por lo tanto, hay mucho que aprender antes de que estos hallazgos puedan utilizarse en una aplicación clínica.

Necesitamos descifrar los mecanismos moleculares responsables del cambio parcial de identidad, esto es, los procesos que permiten la adquisición de funciones nuevas en células que ya están diferenciadas. Si lo logramos, y si encontramos la manera de actuar de forma selectiva sobre las células distintas de las β en el páncreas de un paciente, entonces el nuevo reto consistirá en imaginar terapias innovadoras para tratar de estimular la conversión o reprogramación de dichas células para que produzcan insulina. Tales cambios tal vez puedan conseguirse mediante la administración de fármacos, la inducción de modificaciones epigenéticas o la combinación de ambos enfoques.

Pedro Luis Herrera *es catedrático del Departamento de Medicina Genética y Desarrollo en la Facultad de Medicina de la Universidad de Ginebra.*

PARA SABER MÁS

Conversion of adult pancreatic alpha-cells to beta-cells after extreme beta-cell loss. F. Thorel et al. en *Nature*, vol. 464, págs. 1149-1154, abril de 2010.

Diabetes recovery by age-dependent conversion of pancreatic δ-cells into insulin producers. S. Chera et al. en *Nature*, vol. 514, págs. 503-507, agosto de 2014.

Pancreatic islet-autonomous insulin and smoothened-mediated signalling modulate identity changes of glucagon^{+} α-cells. V. Cigliola et al. en *Nature Cell Biology*, vol. 20, págs. 1267-1277, octubre de 2018.

Diabetes relief in mice by glucose-sensing insulin-secreting human α-cells. K. Furuyama et al. en *Nature*, vol. 567, págs. 43-48, febrero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una década de reprogramación celular. Megan Scudellari en *IyC*, octubre de 2016.

Los caminos hacia la curación de la diabetes. Franz Martín, Eduard Montanya y Bernat Soria en *IyC*, enero de 2017.

MATERIALES

Un raudal de materiales topológicos

Una nueva manera de analizar la estructura electrónica de los materiales ha revelado que un ingente número de ellos posee propiedades topológicas

MAIA G. VERGNIORY Y BARRY BRADLYN



GETTY IMAGES/JONNYSEK/ISTOCK

TOPOLOGÍA OCULTA: Un enfoque bautizado como «química cuántica topológica» ha revelado que un gran número de materiales, como el bismuto (*imagen*), presentan exóticas propiedades de transporte electrónico hasta ahora desconocidas.

Hace más de una década se descubrieron los llamados materiales topológicos. Se trata de materiales con extraordinarias propiedades de transporte electrónico que prometen todo tipo de aplicaciones técnicas, desde la electrónica de baja potencia hasta la espintrónica o la computación cuántica. Su enorme potencial impulsó a los mejores laboratorios y universidades del mundo a buscar compuestos con estas características. Sin embargo, de los aproximadamente 200.000 materiales que sabemos que nos ofrece la naturaleza, solo un centenar fueron diagnosticados como tales. De ellos, la mayoría eran variaciones de una misma estructura química. El cuello de botella se encontraba en la forma en que los físicos buscaban el santo grial en el bosque de los compuestos químicos conocidos: incluso después de encontrar un candidato, los cálculos que había que realizar para determinar sus propiedades eran computacionalmente costosos.

Hace dos años, en una colaboración internacional en la que participamos los dos autores de este artículo, desarrollamos un método transversal que bautizamos como «química cuántica topológica» y que unía aspectos de la física, la química y la teoría de grafos. Gracias a él, en fecha reciente hemos diseñado un procedimiento que permite diagnosticar las propiedades topológicas de cualquier material en pocos minutos y con un coste computacional muy bajo. De esta manera hemos pasado de tener unos 100 candidatos a materiales topológicos a aproximadamente 7500; un número que sin duda crecerá en el futuro. Los principios de este nuevo método se publicaron en febrero de este año en *Nature* y el catálogo de materiales se encuentra disponible para investigadores y empresas en el sitio web www.topologicalquantumchemistry.com.

Electrónica topológica

La topología es la rama de las matemáticas que estudia las propiedades de un cuerpo que permanecen invariantes cuando lo sometemos a transformaciones continuas o «suaves»: aquellas consistentes en doblarlo, comprimirlo o estirarlo, por ejemplo, pero sin agujerearlo o partirlo en dos. Consideremos una naranja. No importa cuánto la doblemos o moldeemos, jamás podremos transformarla en una rosquilla. La razón se debe a que esta última presenta un agujero, mientras que la naranja no. El número de agujeros de un

objeto es un ejemplo de invariante topológica: una de las propiedades básicas de un cuerpo que no pueden alterarse mediante deformaciones continuas.

La topología llegó a la física de materiales de la mano de Klaus von Klitzing y su descubrimiento del efecto Hall cuántico. En 1980, Von Klitzing observó que, en presencia de un campo magnético intenso, la resistencia de una placa metálica pasaba a estar cuantizada: su valor solo podía ser un múltiplo entero de cierta cantidad (la carga del electrón al cuadrado dividida por la constante de Planck). Dos años después, David Thouless y otros investigadores demostraron que —de manera similar a lo que ocurre con el número de agujeros de un objeto— la resistencia del efecto Hall solo podía tomar valores enteros porque estaba asociada a una invariante topológica; en este caso, a una correspondiente a la función de onda cuántica de los electrones.

El hallazgo de Von Klitzing fue reconocido en 1985 con el premio Nobel de física. Por su parte, Thouless, Duncan M. Haldane y J. Michael Kosterlitz se vieron laureados en 2016 por sus investigaciones sobre las propiedades topológicas de la materia. Hoy, este campo de investigación ha entrado en la vanguardia de la física de materiales.

Nuevos aislantes

Las propiedades topológicas más interesantes conocidas hasta la fecha se presentan en los aislantes topológicos: materiales que presentan la peculiaridad de ser aislantes en su interior pero conductores en la superficie. Además, las corrientes eléctricas que aparecen en la frontera son particularmente robustas, ya que deben su aparición a las propiedades topológicas de la función de onda electrónica.

Este comportamiento se debe a que no todos los aislantes son iguales. De la misma manera que una naranja y una rosquilla se diferencian en el número de agujeros, los distintos aislantes pueden clasificarse según cierta invariante topológica relacionada con la forma en que los electrones ocupan los distintos niveles de energía del material. Y así como no podemos deformar suavemente una naranja hasta convertirla en una rosquilla, tampoco es posible convertir un aislante ordinario («sin agujeros») en uno topológico («con agujeros»). Para lograrlo, resulta imperativo pasar antes por una fase metálica.

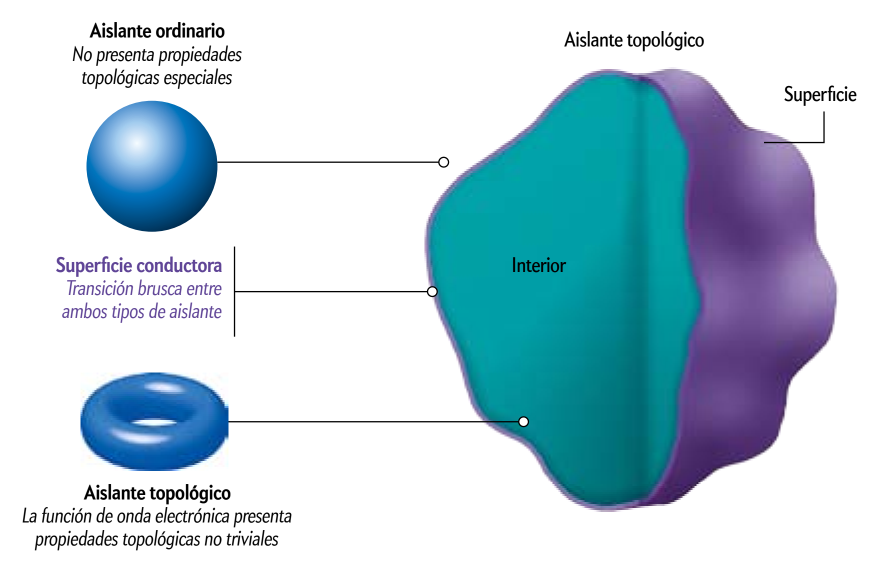
La superficie que rodea a un aislante topológico puede verse como una membrana que separa dos aislantes distintos: el vacío del exterior (el cual puede considerarse un aislante ordinario) y el aislante del interior (con propiedades topológicas no triviales). Por tanto, la superficie del material constituye ese estado de transición entre dos aislantes con propiedades topológicas distintas. Esta es la razón por la que presenta carácter metálico.

Además de sus posibles aplicaciones, el hecho de que su descripción teórica requiera usar conceptos de matemáticas avanzadas, mecánica cuántica y teoría de campos convierte a estos materiales en excelentes plataformas para estudiar todo tipo de fenómenos cuánticos, relativistas y de física de altas energías en sistemas de materia condensada. Asimismo, otras disciplinas, como la fotónica o el estudio de sistemas de átomos fríos, han adoptado estas ideas y han desarrollado sistemas topológicos. No cabe duda de que nos encontramos ante uno de los campos más fascinantes y con mayor proyección de la física de los próximos años, lo que dará lugar a un gran progreso tanto conceptual como técnico.

Reto teórico

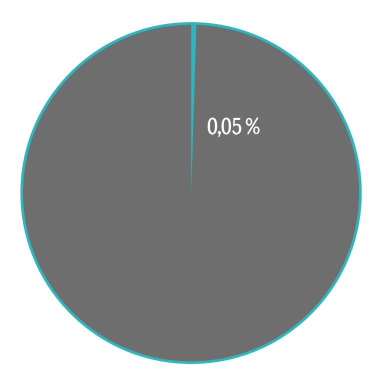
La primera confirmación experimental de la existencia de materiales topológicos se logró en 2006 en láminas delgadas de telururo de mercurio (HgTe). Más tarde, en 2009, se descubrieron varios aislantes topológicos en tres dimensiones, como el sulfuro de bismuto (Bi_2S_3), el telururo de bismuto (Bi_2Te_3) y el telururo de antimonio (Sb_2Te_3). Desde entonces, un centenar de materiales han sido catalogados como topológicos. Sin embargo, la mayoría fueron encontrados debido a su analogía química con los originales o de forma accidental, sin una línea clara que guiara su descubrimiento.

En los últimos años se ha constatado que no solo existen aislantes topológicos, sino también metales y semimetales topológicos. Como hemos mencionado, la transición de un aislante topológico a uno trivial pasa por una fase intermedia de carácter metálico. Esta fase, que se puede inducir mediante presión o modificando la concentración de un elemento en el compuesto correspondiente, conserva la firma de la fase de aislante topológico correspondiente, por lo que sus propiedades son también muy robustas. Los materiales con dichas características

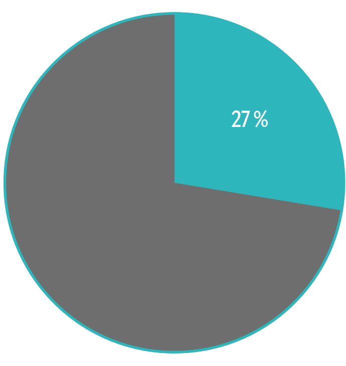


¿QUÉ ES UN AISLANTE TOPOLÓGICO? Estos materiales se caracterizan por el hecho de que la función de onda que describe el comportamiento de sus electrones presenta propiedades topológicas inusuales. Tales propiedades quedan representadas aquí de manera simbólica por un toro (un objeto con un agujero). En el exterior del material, el vacío se comporta como un aislante ordinario, simbolizado mediante una esfera (un objeto sin agujeros). Del mismo modo que no es posible deformar suavemente una esfera hasta convertirla en un toro, las propiedades del exterior no pueden variar suavemente hasta transformarse en las del interior. Ello implica que, en la frontera entre ambos medios (*lila*), las propiedades electrónicas deben sufrir un cambio brusco. Dicho cambio consiste en que, en la superficie, el material se torna conductor.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Porcentaje de materiales topológicos conocidos hasta ahora



Porcentaje de materiales topológicos revelados por el nuevo análisis

ABUNDANCIA DE MATERIALES EXÓTICOS: Debido a sus características únicas, hace años que numerosos laboratorios de todo el mundo se afanan en buscar materiales con propiedades topológicas. Gracias a un nuevo método de análisis que difiere de la teoría tradicional de bandas, un trabajo reciente ha demostrado que es posible determinar en pocos minutos y con un coste computacional muy bajo si un material dado presenta propiedades topológicas o no. El examen de miles de compuestos ha revelado que en torno al 27 por ciento de todos los materiales de la naturaleza serían topológicos, una cifra muy superior a la conocida hasta ahora.

se conocen como metales de Weyl o de Dirac. Pero, al igual que ocurría con los aislantes, el número de metales topológicos conocidos era muy reducido, incluso inferior al de aquellos.

En última instancia, las propiedades que nos interesan obedecen a las simetrías del cristal. Gracias a ello resulta factible progresar en la búsqueda de nuevos materiales. Desde el año 2007 sabemos que, para dilucidar el carácter topológico de un cristal, basta con considerar unos pocos estados electrónicos. Sin embargo, aunque esto nos ayuda a diagnosticar la topología, no nos indica cómo filtrar materiales en un primer momento. Es decir, tendríamos que llevar a cabo el cálculo correspondiente con todos los materiales, algo demasiado costoso.

Mirar con otros ojos

La respuesta a nuestra búsqueda se hallaba en la química. Para construir un cristal, primero hemos de generar una molécula, llamada celda unidad, la cual se repite a lo largo de toda la red. La idea capital es que dicha celda básica, cuya estructura electrónica resulta más fácil de calcular que la de todo el cristal, ya tiene encriptadas las propiedades topológicas de todo el material.

La celda unidad está caracterizada por las posiciones en las que se colocan sus átomos. A su vez, estos quedan descritos por sus orbitales electrónicos, cuyos niveles energéticos se hallan tabulados en bases de datos disponibles desde el siglo pasado. Si conocemos el número de electrones de la celda y sus orbitales, podremos deducir cuáles de ellos revestirán importancia para la física que deseamos estudiar. Los orbitales que se encuentren parcialmente llenos serán los se sitúen cerca del llamado «nivel de Fermi», un nivel energético clave en la descripción de cualquier material y que determina el nivel de energía a partir del cual los electrones pueden conducir la electricidad. Como consecuencia, esos serán los orbitales que determinarán las propiedades de la muestra.

Al mismo tiempo, la posición de los átomos en una red cristalina se encuentra íntimamente relacionada con la manera en que se conectan entre sí las bandas de energía del material (los niveles energéticos que pueden ocupar los electrones; un concepto similar al de orbital, pero definido para toda la red en lugar de para un solo átomo). Esa conectividad entre bandas resulta ser una función de tres ingredientes: los orbitales situados cerca del nivel de Fermi, el grupo de simetría espacial de la red y la posición de los átomos en la celda unidad.

Si el número de bandas que están conectadas no es múltiplo del número de electrones de valencia, entonces nos encontramos ante un metal topológicamente protegido. Si el número de bandas que deberían estar conectadas es un múltiplo del número de electrones y, además, alguna de esas conexiones está rota, entonces hemos identificado un aislante topológico. Este tipo de reglas nos permiten escribir un programa informático que, a partir de una serie de datos sencillos, como los orbitales atómicos, examine de manera sistemática las propiedades topológicas de una lista de compuestos.

Para elaborar nuestro catálogo usamos la Base de Datos de Estructuras Inorgánicas Cristalinas (icsd.fiz-karlsruhe.de), recopilada por la Universidad de Karlsruhe. Al examinar unos 27.000 compuestos, encontramos que unos 7500 tenían propiedades topológicas: una cantidad muy superior a la conocida hasta ahora. Este resultado sugiere que cerca de un 25 por ciento de todos los materiales existentes en la naturaleza serían topológicos. Y, con más candidatos, tenemos más probabilidades de encontrar aquellos óptimos para aplicaciones concretas.

Nuestro equipo de investigación, que incluye a Luis Elcoro, profesor titular de la Universidad del País Vasco, ha publicado los códigos empleados para este análisis en la página web del Servicio Cristalográfico de Bilbao (www.cryst.ehu.es). Junto con nuestro catálogo, disponible también en línea, estos resultados permiten que cualquier persona interesada pueda comprobar si un material determinado es topológico o no, así como la fase cristalina en la que se encuentra. Sin duda, los mismos métodos permitirán encontrar un gran número de materiales topológicos en el futuro y explorar mucho mejor sus posibles aplicaciones.

Maia G. Vergniory *es investigadora Ikerbaske en el Centro Internacional de Física de San Sebastián (DIPC).*
Barry Bradlyn *trabaja en el Departamento de Física y el Instituto de Teoría de la Materia Condensada de la Universidad de Illinois.*

PARA SABER MÁS

Topological quantum chemistry. Barry Bradlyn et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 298-305, julio de 2017.
A complete catalogue of high-quality topological materials. Maia G. Vergniory et al. en *Nature*, vol. 566, págs. 480-485, febrero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

El efecto Hall cuántico. Klaus von Klitzing en *IyC*, octubre de 1986.
Aislantes topológicos. David Carpentier y Laurent Lévy en *IyC*, agosto de 2015.
La química y la física, felizmente unidas. Gregory A. Fiete en *IyC*, enero de 2018.

NEUROCIENCIA

De las redes neuronales a la mente

La neurociencia de redes estudia la emergencia de la actividad mental a partir de la configuración de las conexiones nerviosas en el cerebro

Max Bertolero y Danielle S. Bassett

Ilustraciones de Mark Ross Studios

EN SÍNTESIS

¿Cómo logra el cerebro hacer de nosotros quienes somos? Los esfuerzos por responder a esta cuestión han dado lugar al nuevo campo de la neurociencia de redes, que utiliza una rama de las matemáticas, la teoría de grafos, para modelizar las conexiones del cerebro que nos permiten leer, calcular o, simplemente, sentarnos y tamborilear con los dedos.

La teoría de grafos, que también se utiliza en química, física y lingüística, modeliza las rutas físicas que construyen las redes funcionales a partir de las cuales surgen nuestras capacidades cognitivas, ya sean la visión, la atención, o bien el autocontrol.

Al ir conociendo las redes con un nivel de abstracción cada vez mayor, los investigadores han comenzado a estrechar la brecha que existe entre la materia y la mente. Los beneficios prácticos conllevarían una nueva forma de diagnosticar y tratar trastornos como la depresión.



Danielle S. Bassett es profesora del Departamento de Bioingeniería de la Universidad de Pensilvania, donde estudia las redes de los sistemas físicos y biológicos. En 2014 recibió una beca de la Fundación MacArthur.

Max Bertolero es investigador posdoctoral en el Grupo de Sistemas Complejos de Bassett. Obtuvo el doctorado en neurociencia de sistemas en la Universidad de California en Berkeley, y los grados en filosofía y psicología en la Universidad de Columbia.



La vida está dominada por las redes. Carreteras, ferrocarriles, rutas marítimas y vuelos comerciales constituyen redes intrincadas que utilizamos diariamente. Existen incluso más allá de nuestra experiencia inmediata. Pensemos en Internet, en la red eléctrica y en el universo, donde la Vía Láctea no es más que un nodo infinitesimal en una red de galaxias aparentemente ilimitada. Sin embargo, pocos sistemas de conexiones interactivas tienen la complejidad que alberga nuestro cerebro.

La importancia de la neurociencia está creciendo en estos últimos años a medida que nos hemos ido familiarizando con las neuroimágenes, cuyos ostentosos colores nos muestran las regiones del cerebro que se activan durante una tarea mental. Así tenemos, por ejemplo, el lóbulo temporal, la región cerca del oído que interviene en la memoria, y el lóbulo occipital, que se encuentra en la parte posterior de la cabeza y se encarga de la visión.

Pero en este conocimiento sobre el funcionamiento del cerebro humano se echa en falta la manera en la que interaccionan todas las regiones del órgano para hacer de nosotros quienes somos. En nuestro laboratorio y en otros se ha tomado prestado el lenguaje de una rama de las matemáticas, denominada teoría de grafos, para analizar, sondear y predecir las interacciones complejas del cerebro. Se pretende así estrechar la aparentemente inmensa brecha existente entre el frenesí de la actividad eléctrica neuronal y una serie de tareas cognitivas, como sentir, recordar, tomar decisiones, aprender nuevas habilidades e iniciar el movimiento. Este nuevo campo de la neurociencia de redes se cimienta, y refuerza, en la idea de que determinadas regiones del cerebro llevan a cabo actividades definidas. En el sentido más fundamental, lo que el cerebro es (y, por tanto, lo que somos como seres conscientes) queda definido, de hecho, por una extensísima red de 100 mil millones de neuronas con al menos 100 billones de conexiones, o sinapsis.

La neurociencia de redes pretende capturar esta complejidad gracias a que podemos modelizar los datos aportados por las neuroimágenes como un grafo compuesto por nodos y enlaces. En un grafo, los nodos (también llamados vértices) representan las unidades de la red, como las neuronas o, en otro contexto, los aeropuertos. Los enlaces (o aristas) sirven para conectar los nodos —pensemos en las sinapsis entre neuronas o en las rutas aéreas de los aviones—. En nuestro trabajo, el cerebro humano se reduce a un grafo de unos 300 nodos. Las distintas regiones se comunican entre sí mediante enlaces correspondientes a las conexiones estructurales del cerebro, unos enormes manojos de «cables» que constituyen la materia blanca. Esta descripción como una red unificada ya ha proporcionado una imagen más clara del funcionamiento cognitivo, y desde un punto de vista más práctico, también ha mejorado el diagnóstico y el tratamiento de los trastornos psiquiátricos. Como apuesta de futuro, el conocimiento de las redes cerebrales nos ayudaría a mejorar los programas de inteligencia artificial, los nuevos fármacos y las técnicas de estimulación eléctrica para corregir el mal funcionamiento de los circuitos neuronales en la depresión y, quizá también, desarrollar genoterapias para las enfermedades mentales.

LA MÚSICA DE LA MENTE

Para conocer la dependencia de las redes que tienen nuestras capacidades cognitivas, consideraremos la analogía de una orquesta que toca una sinfonía. Hasta hace poco, la mayoría de los neurocientíficos estudiaban el funcionamiento de cada una de las regiones del cerebro por separado, el equivalente neuronal de

separar los metales, la percusión, las cuerdas y los instrumentos de viento. Pero esta estratificación no es más que una estrategia de los tiempos de Platón en la que, en términos muy simples, se descompone la naturaleza por las juntas y luego se estudian cada uno de los componentes que quedan.

Al igual que resulta útil conocer el procesamiento de las emociones gracias a la amígdala, también resulta vital captar cómo consigue un violín producir sonidos muy agudos. Aun así, una lista completa de las regiones del cerebro y sus funciones (visión, movimiento, emoción, etcétera) no nos contará cómo trabaja este órgano en conjunto. Como tampoco un inventario de instrumentos nos da la fórmula de la sinfonía *Heroica* de Beethoven.

Los neurocientíficos de redes han comenzado a domar estos misterios al examinar la manera en la que cada región del cerebro se inserta en una red más grande de tales regiones. Y han trazado las conexiones entre las regiones para estudiar cómo se inserta cada una en la gran red integrada que es el cerebro. Hay dos enfoques principales. En el primero, la exploración de la conectividad estructural identifica los instrumentos disponibles en la orquesta del cerebro. Se trata de la manera física de crear la música: la instrumentación única de una obra musical dada limita lo que puede tocarse. Los instrumentos son importantes, pero no son la música. Visto de otro modo, al igual que una colección de instrumentos no es la música, un conjunto de cables no representa el funcionamiento del cerebro.

En el segundo, el cerebro vivo es una orquesta enorme de neuronas que se activan a la vez siguiendo pautas específicas. Escuchamos una música cerebral cuando medimos la correlación entre la actividad de cada pareja de regiones, lo que indica que están trabajando en concierto. Esta medición de la actividad conjunta se denomina conectividad funcional y nos imaginamos, de manera informal, que representa la música del cerebro. Si dos regiones se activan con las mismas fluctuaciones temporales, se considera que mantienen una conexión funcional. Esta música es tan importante como los decibelios producidos por una trompa o una viola. Se podría decir que el volumen de la música cerebral corresponde al nivel de actividad de las señales eléctricas que zumban por una región del cerebro o por otra.

No obstante, en un momento dado, algunas regiones de este órgano de kilo y pico están más activas que otras. Todos hemos oído decir que las personas utilizan una pequeña proporción de su capacidad cerebral. Pero lo cierto es que todo él está activo en cualquier momento, si bien una tarea dada modulará la actividad de una única parte del cerebro con respecto a un nivel de actividad inicial.

Esta disposición no significa que solo usemos la mitad de nuestro potencial cognitivo. De hecho, si todo el cerebro estuviera muy activo al mismo tiempo, sería como si todos los miembros de la orquesta estuvieran tocando tan fuerte como les fuera posible, un escenario que crearía el caos e impediría cualquier comunicación. El sonido ensordecedor no transportaría la emoción de los sobretonos presentes en una obra maestra, porque el tono, los ritmos, el tempo y las pausas estratégicas son los que transmiten la información, tanto en una sinfonía como dentro de la cabeza.

MODULARIDAD

Al igual que una orquesta puede dividirse en grupos por familias de instrumentos, el cerebro puede separarse en colecciones de nodos denominadas módulos, que no son más que una descripción de las redes localizadas. Todos los cerebros son modulares, incluida la red de 302 neuronas del nematodo *Caenorhabditis elegans*. Las conexiones entre los nodos de un módulo son más fuertes que las que tienen con otros.

Cada módulo tiene una determinada función, del mismo modo que cada familia de instrumentos toca su partitura en la sinfonía. Hace poco, evaluamos un gran número de estudios independientes (metanálisis) que incluyó más de 10.000 experimentos con imágenes de resonancia magnética funcional (RMf) de sujetos que llevaron a cabo 83 tareas cognitivas. Descubrimos que las distintas tareas se ubicaban en diferentes módulos de las redes cerebrales. Hay módulos que se ocupan de la atención, de la memoria y del pensamiento introspectivo, mientras que otros se dedican a la audición, al movimiento y a la visión.

En estos procesos cognitivos sensoriales y motores intervienen módulos contiguos únicos, la mayoría de los cuales están confinados a un lóbulo del cerebro. También encontramos un aspecto crítico del procesamiento modular: las computaciones en unos módulos no desencadenaban una mayor actividad en otros. Imaginemos un escenario en el que cada músico de una orquesta tenga que cambiar las notas que toca cada vez que otro músico cambia las suyas. La orquesta entraría en una espiral sin control que, desde luego, no produciría sonidos agradables. El procesamiento en el cerebro es parecido, pues cada módulo debe ser capaz de funcionar con la mayor independencia posible. Esta necesidad ya la habían señalado filósofos tan antiguos como Platón y tan recientes como Jerry Fodor, y nuestra investigación la confirma.

Una lista de las regiones del cerebro y sus funciones no nos informa sobre cómo trabaja este, como tampoco un inventario de instrumentos nos permite conocer una sinfonía

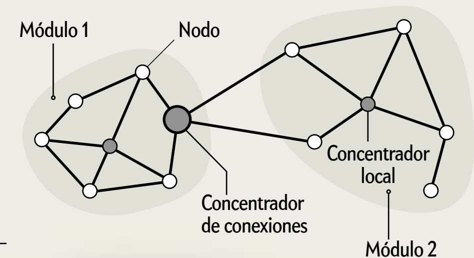
Pero aunque los módulos sean en buena parte independientes, una sinfonía requiere que las familias de instrumentos toquen al unísono. La información generada por cada uno debe acabar integrada con la de los otros. Si viéramos una película solo con el módulo del cerebro para la visión, sin acceder al de las emociones, estaríamos perdiéndonos una gran parte de la experiencia.

Por esta razón, para completar muchas tareas cognitivas, los módulos deben a menudo trabajar codo con codo. Una tarea de la memoria a corto plazo, como retener un nuevo número de teléfono, requiere la cooperación de los módulos de la audición, de la atención y de procesamiento de la memoria. Para integrar y controlar la actividad de muchos módulos, el cerebro utiliza concentradores (*hubs*), esto es, nodos que reciben las conexiones de otros módulos.

Algunos módulos clave que controlan e integran la actividad cerebral operan de una manera menos circunspecta y sus conexiones se extienden globalmente a numerosos lóbulos. El módulo de control frontoparietal abarca los lóbulos frontal, parietal y temporal, su desarrollo es más o menos reciente en la escala evolutiva, y es especialmente mayor en los humanos

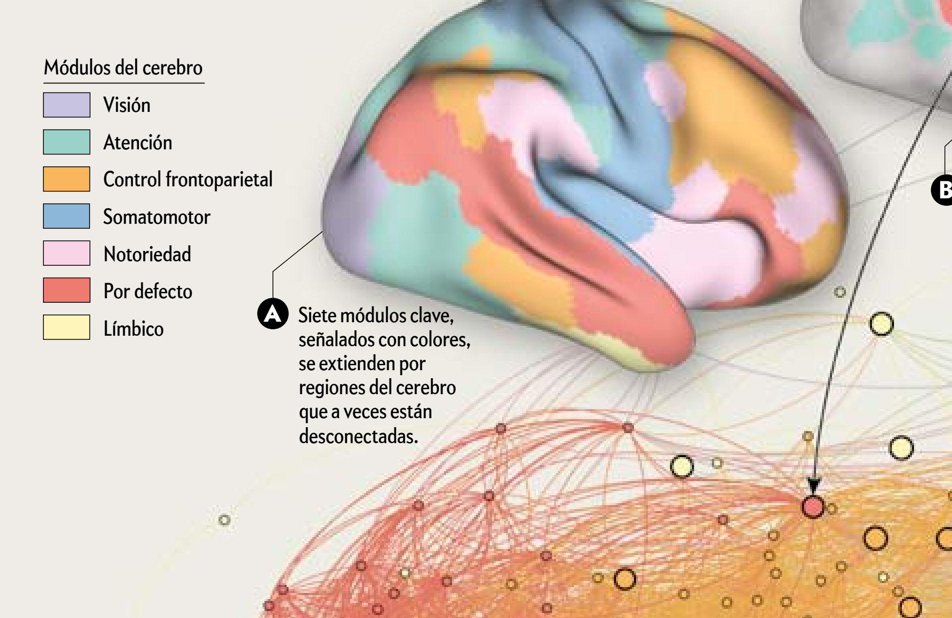
Descodificar 100 billones de mensajes

La Vía Láctea tiene cientos de miles de millones de estrellas, una cifra pequeña en comparación con los 100 billones de conexiones del cerebro que nos permiten sentir, pensar y actuar. Para descifrar esta complejidad, los neurocientíficos de redes trazan un mapa, o «grafo». Este está constituido por nodos unidos por enlaces que conforman módulos, los cuales, a su vez, se comunican entre sí a través de nodos muy conectados denominados concentradores.



De los módulos a los concentradores y a los pensamientos

Un conjunto de nodos forma un módulo, y los módulos se dedican a procesar la visión, la atención y los comportamientos motores, entre otras tareas **A**. Algunos de los nodos actúan como concentradores locales que se enlazan con otros nodos de su propio módulo. Un nodo que establece enlaces con numerosos módulos se denomina concentrador de conexiones (el tipo que suele mencionarse con más frecuencia en este artículo) **B**. Sus diferentes conexiones entre módulos del cerebro son críticas para muchas tareas, sobre todo para los comportamientos complejos **C**.



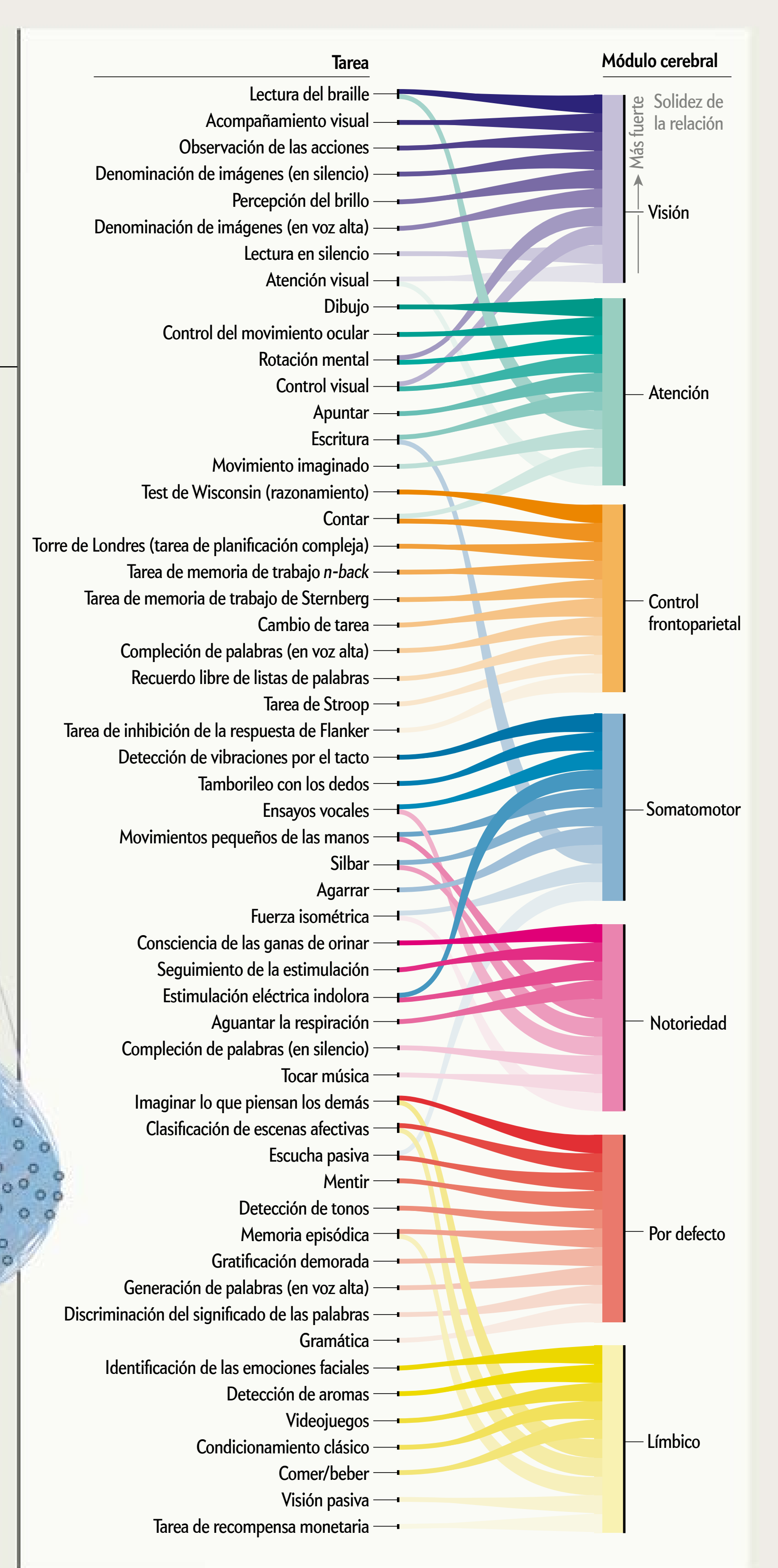
A Siete módulos clave, señalados con colores, se extienden por regiones del cerebro que a veces están desconectadas.

B En esta vista lateral aparecen los concentradores de conexiones con los enlaces más fuertes a otros muchos módulos, coloreados según los siete módulos fundamentales del cerebro.

C Un grafo de nodos y enlaces del cerebro humano muestra los concentradores de conexiones más fuertes representados como círculos grandes. El color de cada nodo representa el módulo al que pertenece. Los nodos pueden visualizarse como imanes que se repelen, pero que siguen juntos gracias a los enlaces que actúan de muelle para mantenerlos unidos. Los nodos fuertemente conectados forman grupos. Los concentradores de conexiones ocupan el centro porque están bien conectados con todos los módulos.

Integración

Los módulos para la visión, la atención y otras funciones cognitivas se encargan de tareas específicas, a menudo representadas aquí por tests psicológicos. Las tareas más activas están en lo más alto. Por ejemplo, el módulo de la visión interviene en la denominación, la lectura y la observación. Para muchas tareas se necesitan varios módulos. Por ejemplo, en una tarea de rotación mental participarán los módulos de visión y de atención. Algunos módulos se encomiendan a tareas más abstractas. El módulo frontoparietal se encarga de cambiar de tarea o de recordar listas. El módulo del modo por defecto atiende a los estados emocionales subjetivos o a la escucha pasiva cuando una persona está en reposo.



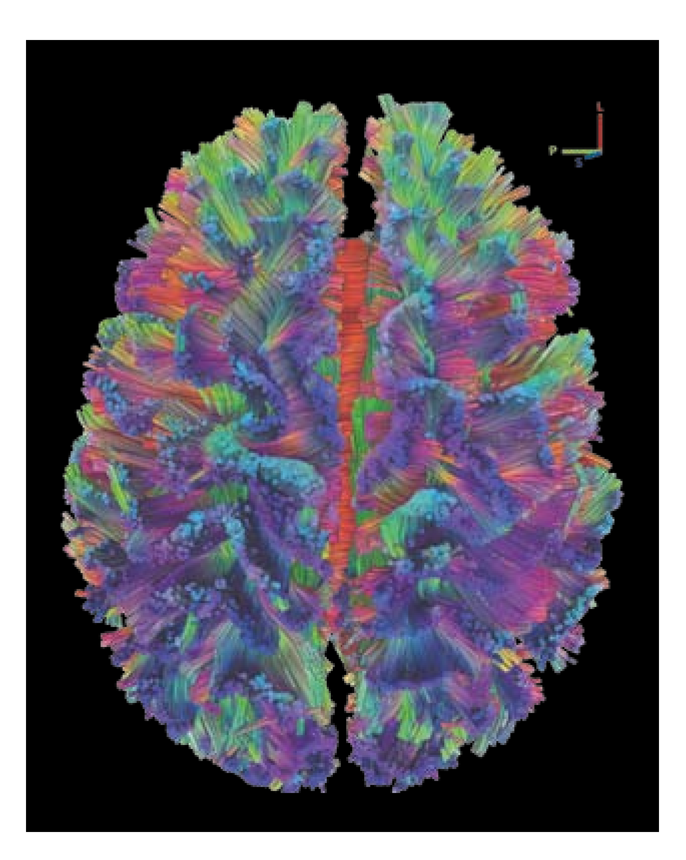
GRÁFICOS DE MAX BERTOLERO (*cerebros y diagrama de redes*), JEN CHRISTIANSEN (*diagrama de tareas*)

que en nuestros antepasados primates más cercanos. Se activa ante un gran número de tareas cognitivas y sería análogo a un director de orquesta.

El módulo frontoparietal garantiza que los numerosos módulos cerebrales funcionen al unísono. Está muy implicado en la función ejecutiva, que abarca los procesos independientes de toma de decisiones, memoria a corto plazo y control cognitivo (la capacidad de desarrollar estrategias complejas e inhibir el comportamiento inadecuado).

Otro módulo con numerosas interconexiones es el de notoriedad (*salience*), que está acoplado con el del control frontoparietal y contribuye a una serie de comportamientos relacionados con la atención y a la respuesta a nuevos estímulos. Por ejemplo, echemos un vistazo a dos palabras: *azul* y *rojo*. Si se nos pide que digamos el color de la palabra, reaccionaremos mucho más rápido a la que está en rojo. Los módulos de notoriedad y frontoparietal se activan al responder *verde* ante la primera palabra, porque tenemos que suprimir una inclinación natural a leer la palabra *azul*.

Finalmente, el módulo del modo por defecto abarca los mismos lóbulos que la red de control frontoparietal. Contiene muchos concentradores y está enlazado con muy diversas tareas cognitivas, que incluyen el pensamiento introspectivo, el aprendizaje, la recuperación de los recuerdos, el procesamiento emocional, la inferencia del estado mental de los otros e, incluso, las apuestas. Cualquier daño en estos módulos ricos en concentradores resulta crítico porque altera las conexiones funcionales por todo el cerebro y provoca dificultades cognitivas generalizadas, al igual que el mal tiempo en un aeropuerto de conexión retrasa el tráfico aéreo por todo el país.



LAS NUMEROSAS CONEXIONES de la sustancia blanca de esta imagen se utilizan para modelizar las rutas físicas del cerebro. Las redes funcionales utilizan estos enlaces estructurales para llevar a cabo una serie de tareas cognitivas.

DANIELLE S. BASSET Y MATTHIEW CIESLAK. UNIVERSIDAD DE PENSILVANIA

CONEXIONES PERSONALES

Aunque nuestro cerebro contenga determinados componentes básicos de las redes (módulos interconectados por concentradores), cada uno de nosotros muestra ligeras variaciones en la configuración de los circuitos neuronales. Los investigadores se han dedicado recientemente a examinar a fondo esta diversidad. En una fase inicial del Proyecto del Conectoma Humano, financiado por los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. (NIH), 1200 jóvenes se ofrecieron voluntarios para participar en un estudio sobre la arquitectura de las redes cerebrales. Las redes de conectividad funcional y estructural de cada individuo se evaluaron mediante RMf. Estos datos se complementaron con una batería de pruebas cognitivas y cuestionarios para analizar 280 rasgos cognitivos y conductuales. Los participantes aportaron información sobre su calidad del sueño, consumo de alcohol, habilidades de lenguaje y memoria, y estado emocional. Los neurocientíficos de todo el mundo comenzaron a estudiar de forma minuciosa estos conjuntos extraordinariamente diversos de datos para aprender la manera en que las redes cerebrales codifican lo que somos.

Con los datos de cientos de participantes del Proyecto del Conectoma Humano, en nuestro laboratorio y en otros hemos demostrado que los patrones de conectividad del cerebro dan lugar a una «huella dactilar» distintiva en cada individuo. Las personas con conexiones funcionales fuertes entre determinadas regiones tienen un vocabulario extenso y muestran una inteligencia más fluida que les resulta útil para solucionar nuevos problemas, y no les cuesta esperar a una recompensa. Tienden a tener más educación, estar más satisfechos con la vida, mostrar mejor memoria y prestar más atención. Quienes presentan conexiones funcionales más débiles entre estas mismas regiones del cerebro exhiben una inteligencia menos fluida, antecedentes de drogadicción, una capacidad de concentración inferior y peor calidad del sueño.

Inspirados por ese proyecto, demostramos que los hallazgos podían describirse mediante patrones concretos entre los concentradores. Si la red de nuestro cerebro tiene concentradores fuertes con numerosas conexiones entre módulos, tenderá a presentar módulos bien diferenciados y funcionará mejor en una serie de tareas, como la memoria a corto plazo, las matemáticas, el lenguaje o la cognición social. En pocas palabras, nuestros pensamientos, sentimientos, rarezas, defectos y habilidades mentales están codificados por la organización específica del cerebro como una red integrada y unificada. En suma, la música que toca el cerebro hace que seamos quienes somos.

Los módulos sincronizados establecen nuestra identidad y nos ayudan a conservarla con el paso del tiempo. Las composiciones musicales que tocan se parecerán mucho siempre. Esa semejanza se puso de manifiesto cuando los participantes de otros dos estudios del Proyecto del Conectoma Humano se embarcaron en diferentes tareas en las que intervenían la memoria a corto plazo, el reconocimiento de las emociones de los otros, las apuestas, el tamborileo con los dedos, el lenguaje, las matemáticas, el razonamiento social y un «estado de reposo» autoinducido en el que dejaban vagar la mente.

De modo fascinante, el cableado funcional de las redes para todas esas actividades tenía más similitudes de las esperadas. Si volvemos a nuestra analogía, no es que el cerebro toque a Beethoven al hacer matemáticas y a Tupac cuando descansa,

sino que la sinfonía que se produce en la cabeza es el resultado del mismo músico interpretando el mismo género musical. Esta coherencia deriva del hecho de que las rutas físicas, o conexiones estructurales, imponen limitaciones en los caminos de la red cerebral integrada que puede recorrer una señal neuronal. Estas vías delinean, además, la posible configuración de las conexiones funcionales, las de, digamos, las matemáticas o el lenguaje. En la metáfora musical, un bombo no puede tocar la línea melódica de un piano.

Es inevitable que se produzcan cambios en la música del cerebro, como los introducidos por los nuevos arreglos para la música orquestal. Las conexiones físicas se someten a alteraciones a lo largo de meses o años, mientras que la conectividad funcional cambia en segundos, cuando una persona pasa de una tarea mental a la siguiente.

Las transformaciones de la conectividad tanto estructural como funcional son importantes durante el desarrollo del cerebro adolescente, cuando se están dando los últimos retoques al esquema de cableado de la masa gris. Este período es crítico porque los primeros signos de los trastornos mentales suelen aparecer en la adolescencia o al comienzo de la edad adulta [*véase* «La plasticidad del cerebro adolescente», por Jay N. Giedd; Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

Un campo con el que está relacionada nuestra investigación es el conocimiento del desarrollo de las redes cerebrales desde la infancia, pasando por la adolescencia, hasta alcanzar la edad adulta. Estos procesos vienen impulsados por los cambios fisiológicos subyacentes, pero también están influidos por el aprendizaje, la exposición a nuevas ideas y destrezas, el estado socioeconómico del individuo y otras experiencias.

Los módulos de las redes cerebrales surgen muy pronto en la vida, incluso en el vientre materno, pero su conectividad se refina a medida que crecemos. La consolidación de las conexiones estructurales con los concentradores durante la infancia se asocia a una mayor segregación de los módulos y a un aumento de la eficacia con la que los jóvenes realizan las tareas ejecutivas, como el razonamiento complejo y la autorregulación. También hemos descubierto que el grado de segregación de los módulos es más rápido en los niños pertenecientes a un nivel socioeconómico más alto, lo que pone de relieve la influencia del entorno.

Aunque los cambios de la conectividad estructural sean lentos, la reconfiguración de las conexiones funcionales se produce con rapidez, en unos pocos segundos o minutos. Estos cambios veloces son decisivos para pasar de una tarea a otra y para el enorme aprendizaje que demanda incluso una única tarea. En una serie de estudios que publicamos desde 2011 hasta la actualidad, hemos observado que las redes dotadas de módulos que pueden cambiar con facilidad corresponden a los individuos cuya función ejecutiva y capacidad de aprendizaje son mayores.

Para entender mejor nuestras observaciones, utilizamos los datos públicos disponibles de un estudio de referencia denominado MyConnectome, en el que Russell Poldrack, profesor de psicología de la Universidad Stanford, se sometió personalmente a la toma de imágenes y a evaluaciones cognitivas tres veces a la semana durante más de un año. Aunque la mayoría de los módulos son autónomos y están aislados, a veces el cerebro reorganiza sus conexiones de manera espontánea. Esta propiedad, denominada flexibilidad de las redes funcionales, permite que un nodo con fuertes conexiones funcionales dentro de un módulo establezca repentinamente muchas conexiones con otro módulo, lo que cambia el flujo de información a través de la red. A partir de los datos de este estudio hallamos que la reorientación de las conexiones de una red cambia de un día a otro de una manera que concuerda con el buen ánimo, la excitación sexual y el cansancio. En los individuos sanos, tal flexibilidad de las redes guarda relación con una mejor función cognitiva.

NOTAS DISONANTES

En la configuración de las conexiones cerebrales también se refleja nuestra salud mental. Depresión, esquizofrenia, alzhéimer, párkinson, trastorno del espectro autista, trastorno por déficit de atención, demencia y epilepsia son dolencias que van acompañadas de defectos en los patrones de conectividad.

La mayoría de las enfermedades mentales no están confinadas a una región del cerebro. Los circuitos alterados en la esquizofrenia se extienden por casi todo el órgano. La supuesta hipótesis de disconectividad en la esquizofrenia sostiene que no hay nada anómalo en los módulos del individuo, sino que este trastorno mental está relacionado con una profusión de conexiones entre los módulos.

En un cerebro sano, los módulos son principalmente autónomos y están aislados, y la capacidad para suscitar los cambios flexibles en las conexiones de las redes resulta beneficiosa para el funcionamiento cognitivo, siempre dentro de unos límites. En nuestro laboratorio, hallamos un exceso de flexibilidad en relación con la autorreconfiguración de las redes del cerebro de las personas con esquizofrenia y de sus parientes cercanos. Las alucinaciones auditivas podrían producirse cuando los nodos cambian inesperadamente los enlaces entre los módulos del habla y de la audición. La mezcla inopinada puede dar lugar a lo que parecen ser voces dentro de la cabeza.

Al igual que la esquizofrenia, el trastorno depresivo mayor no está ocasionado por una única región cerebral anómala, sino que se ven afectados tres módulos específicos: el de control frontoparietal, el de notoriedad y el del modo por defecto. De hecho, los síntomas de la depresión, como la desinhibición emocional, la sensibilidad alterada ante los fenómenos emocionales y el exceso de cavilación, se sitúan en dichos módulos.

Como consecuencia, se desestabiliza la comunicación normal entre los tres módulos, con lo que se detectan actividades que van y vienen de uno a otro para equilibrar el procesamiento cognitivo de los estímulos sensoriales con más pensamientos introspectivos. En la depresión, no obstante, el modo por defecto es el que domina y la persona afectada se sume en un estado meditabundo. Así pues, la música del cerebro se vuelve cada vez más desequilibrada y una familia de instrumentos acaba dominando la sinfonía. Estas observaciones han ampliado nuestro conocimiento sobre las propiedades de las redes en la depresión hasta tal punto que, en el futuro, un patrón de conectividad del cerebro nos permitirá diagnosticar algunos subtipos del trastorno y determinar qué regiones deben tratarse mediante las técnicas de estimulación eléctrica.

LAS REDES EVOLUCIONAN

Además de estudiar el desarrollo, los neurocientíficos han comenzado a preguntarse por qué las redes cerebrales han tardado decenas de miles de años en adquirir su forma actual. Las áreas identificadas como concentradores son también las zonas del cerebro humano que más se han expandido durante la evolución, con un aumento de tamaño de hasta 30 veces con respecto a las de los macacos. Los concentradores más grandes muy probablemente permitan una mejor integración de procesamientos entre

los módulos y, por lo tanto, den soporte a computaciones más complejas. Es como si la evolución incrementase el número de músicos de una parte de la orquesta para propiciar las melodías más intrincadas.

Otro modo con el que los neurocientíficos han explorado estas cuestiones ha consistido en generar redes por ordenador y someterlas luego a presiones evolutivas. En nuestro laboratorio, hemos comenzado a sondear el origen evolutivo de los concentradores con una red en la que todos los enlaces se colocaban uniformemente al azar. A continuación, la red se reconfiguraba simulando la selección natural para segregar los módulos y visualizar una propiedad conocida en teoría de redes como «de mundo pequeño», en la que las rutas se forman para que los nodos más alejados se comuniquen con una facilidad sorprendente. Acto seguido, se dejaba que miles de tales redes evolucionaran, con lo que en cada una de ellas terminaban por aparecer concentradores muy conectados a numerosos módulos, pero también estrechamente interconectados entre sí, para formar un club. Nada del proceso de selección favoreció de manera explícita un determinado club de concentradores, sino que estos surgieron simplemente como resultado del proceso iterativo.

La simulación demuestra que una posible solución al desarrollo de un cerebro capaz de intercambiar información entre módulos exige la presencia de concentradores muy conectados. En especial, las redes reales (cerebros, aeropuertos, redes eléctricas) también tienen concentradores estrechamente interconectados y duraderos, exactamente como se predijo con los experimentos evolutivos. Esta observación no significa por fuerza que la evolución se produjese del mismo modo que en la simulación, pero muestra una de las maneras en las que operarían las triquiñuelas de la naturaleza.

ESTADOS DE ÁNIMO

Cuando Richard Feynman, ganador del premio Nobel de física, murió en 1988, en su pizarra se leía: «Lo que no puedo crear, no lo entiendo». Concibió un bonito aforismo, aunque podría reescribirse para que incluyera una idea esencial: «Lo que no puedo crear *y controlar*, no lo entiendo». En ausencia de tal control, sabemos lo suficiente para disfrutar de una sinfonía, pero no estamos cualificados para ejercer de director.

Con respecto al cerebro, tenemos un conocimiento básico de su forma y lo importante que resulta la estructura de su red. Sabemos que determina nuestra identidad, pero apenas hemos comenzado a conocer cómo lo hace. Si nos basamos en la explicación que el matemático Pierre-Simon Laplace dio del determinismo y de la mecánica para aplicarla al cerebro, podríamos pensar que el cerebro actual de una persona, y por lo tanto su estado mental, sería una compilación de estados pasados que podría utilizarse para predecir el futuro. Un neurocientífico que conociera todos los principios del funcionamiento cerebral y todo sobre el cerebro de una persona podría predecir el estado mental de esta. En otras palabras, el futuro y el pasado estarían presentes dentro de cada mente.

Este conocimiento podría valer para prevenir el dolor y el sufrimiento, dado que muchas enfermedades mentales llevan asociadas anomalías en las redes. Con suficiente ingenio, podríamos desarrollar dispositivos implantables que alteraran o incluso generaran nuevas redes cerebrales, o podríamos editar los genomas para impedir desde un principio que se produjera la desorganización de las redes asociada a los trastornos mentales. Tal logro nos permitiría tratar las enfermedades y restaurar el funcionamiento del cerebro después de un ictus o una lesión, y mejorarlo en los individuos sanos.

Antes de que se materialicen estos escenarios futuristas, deben cerrarse dos brechas importantes: necesitamos saber más sobre cómo la genética personal, el desarrollo de los primeros años de vida y el entorno determinan la estructura del cerebro, y cómo esta conduce a las capacidades funcionales. El genoma humano ha aportado a los neurocientíficos algunos conocimientos sobre la estructura que da lugar a las redes funcionales, pero nos falta entender mejor el mecanismo de este proceso. Hemos comenzado a averiguar cómo se desarrollan las redes cerebrales y cómo las moldea el entorno, pero nos hallamos lejos de explicar toda la complejidad de este proceso. El cableado del cerebro, su conectividad estructural, condiciona el modo en el que interaccionan los diferentes módulos, pero seguimos sabiendo poco sobre ello. A medida que vayamos llenando estos huecos, mejorarán las posibilidades de intervenir para que el cerebro recupere las trayectorias sanas.

Lo que nos retrasa, por el momento, es nuestra aún borrosa visión del cerebro, como si estuviéramos fuera de la sala de conciertos y hubiéramos visto solo esbozos de los instrumentos. Dentro de cada región que estudiamos los neurocientíficos hay millones de neuronas que se activan cada milisegundo, y tan solo somos capaces de medir indirectamente su nivel medio de actividad cada segundo, más o menos. Hasta aquí hemos podido vislumbrar las conexiones estructurales del cerebro humano. Afortunadamente, los científicos y los ingenieros han tomado medidas para ofrecernos datos cada vez más claros que nos permitirán mirar con más profundidad en lo que quizás sea la red más compleja del universo conocido: nuestro cerebro.

PARA SABER MÁS

Network neuroscience. Danielle S. Bassett y Olaf Sporns en *Nature Neuroscience*, vol. 20, págs. 353-364, marzo de 2017.
Graph theory methods: Applications in brain networks. Olaf Sporns en *Dialogues in Clinical Neuroscience*, vol. 20, n.º 2, págs. 111-121, junio de 2018.
A mechanistic model of connector hubs, modularity and cognition. Maxwell A. Bertolero et al. en *Nature Human Behaviour*, vol. 2, págs. 765-767, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cien billones de conexiones. Carl Zimmer en *IyC*, marzo de 2011.
La ofensiva cerebral. Ulrike Gebhardt en *MyC*, n.º 65, 2014.
El cerebro, un órgano personal. Christian Wolf en *MyC*, n.º 79, 2016.
En la jungla de las neuronas. Jeff W. Lichtman et al. en *MyC*, n.º 84, 2017.

FARMACOLOGÍA

EL NACIMIENTO DE LA FOTOFARMACOLOGÍA



Se está desarrollando una nueva generación de fármacos que pueden activarse y desactivarse mediante luz. La gran selectividad que ofrecen reduce los efectos secundarios y abre nuevos caminos hacia terapias altamente específicas para el dolor, el cáncer y el párkinson

Xavier Rovira Algans y Xavier Gómez Santacana

EN SÍNTESIS

La mayoría de los fármacos causan efectos secundarios indeseados. Ello se debe a que actúan, además de sobre la diana terapéutica, en otros lugares donde no deberían.

Los fotofármacos permiten solventar este problema, ya que pueden activarse y desactivarse, mediante luz, con un gran control del lugar de acción y solo durante el tiempo deseado.

Varios grupos de investigación en todo el mundo están desarrollando esta nueva generación de fármacos altamente específicos, que están abriendo nuevas vías para el tratamiento de la ceguera, el dolor, el cáncer y el párkinson.



Xavier Rovira Algans, doctor en neurociencias, coordina la línea de investigación en fotofarmacología molecular del Laboratorio de Reparación y Regeneración Tisular (TR2Lab) de la Universidad de Vic - Universidad Central de Cataluña.

Xavier Gómez Santacana, doctor en química especializado en química médica y fotofarmacología, es investigador posdoctoral en el Instituto de Genómica Funcional (IGF-CNRS) en Montpellier.



«Son las siete de la mañana. Como cada día, suena el despertador. Pero hoy conmigo se despiertan también la primavera y el florecer de los árboles, arbustos y demás plantas que fabrican esa sustancia tremendamente volátil y ligera llamada polen. Cuando llega a mi nariz, el polvillo invisible me produce mucosidad, irritación ocular y ganas de estornudar. Me dirijo al cuarto de baño, abro el armario del botiquín y, *¡voilá!*, aparece mi salvadora: una cajita blanca con unas letras que dicen "Atarax". La abro, tomo una pastillita y a trabajar. Pero tendré que beber un café de más antes de la reunión ejecutiva, ya que el antihistamínico que contienen estos comprimidos me salvará del brote alérgico, pero también me provocará un sueño que difícilmente podré disimular delante de mi jefe.»

Si es usted alérgico al polen, esta escena le resultará familiar. Cuando ingerimos un antihistamínico, este pasa al sistema digestivo, se absorbe y llega al riego sanguíneo, donde se distribuye, de forma generalizada, a lo largo y ancho del cuerpo. Finalmente, alcanza los receptores de histamina que nos provocan las dichosas reacciones alérgicas y los inactiva, con lo que desaparecen «milagrosamente» los molestos síntomas. No obstante, en este recorrido, una pequeña fracción del fármaco llega al cerebro, donde también hay receptores de histamina, y produce ese sueño inexcusable. Un caso típico de efecto secundario.

Los antihistamínicos ilustran lo que suele ocurrir con la mayoría de los medicamentos: que se distribuyen por el cuerpo de forma indiscriminada. Si a ello le sumamos el hecho de que, en numerosas ocasiones, la proteína o receptor para el que el fármaco ha sido diseñado (diana) desempeña funciones distintas según donde se encuentre en el organismo, el efecto secundario está servido. Así, el fármaco puede provocar el efecto deseado en una parte del cuerpo (antialérgico, en el ejemplo que nos ocupa), mientras que en otra región produce consecuencias no deseadas (somnolencia). Lo que falla, pues, es lo que los farmacólogos denominan «selectividad del lugar de acción». (Si bien en el caso de los antiestamínicos parte de este problema se ha solucionado con fármacos de segunda generación que atraviesan en menor medida la barrera hematoencefálica, estos siguen provocando efectos secundarios por su actividad en regiones distintas al sistema nervioso.)

Además de la falta de selectividad en el lugar de acción, los efectos secundarios pueden deberse también a otro factor: la falta de selectividad del fármaco para activar o desactivar solamente cierto tipo de proteínas o receptores.

Imagine ahora que tenemos en nuestras manos un medicamento que podemos introducir en el cuerpo humano y dejar inactivo hasta que nosotros le indiquemos cuándo, dónde y de qué manera debe actuar. Imagine también que utilizamos la luz para activar y desactivar este fármaco en la parte del cuerpo que queramos, durante el tiempo que necesitemos y con la intensidad que nos interese. Esto es precisamente lo que persigue la fotofarmacología, una rama emergente de la ciencia que desarrolla terapias basadas en fármacos fotosensibles.

La fotofarmacología se enmarca en el campo de la administración dirigida de fármacos (*targeted drug delivery*), una estrategia que pretende solventar los problemas derivados de la falta de selectividad de los medicamentos. En este gran grupo de técnicas, generalmente focalizadas en encontrar nuevos tratamientos contra el cáncer, se incluyen también el encapsulamiento de fármacos en nanopartículas, lipomas, micelas o dendrímeros que liberan el medicamento de modo más o menos preciso en el tejido que se debe tratar [*véase* «Fármacos dirigidos contra el cáncer», por Dina Fine Maron; Investigación y Ciencia, junio de 2015].

Sin embargo, esas estrategias topan aún con ciertas limitaciones que impiden el salto a su aplicación médica. Una de estas dificultades es que, una vez liberados, los fármacos se distribuyen de forma inespecífica, lo que puede producir efectos indeseados en tejidos adyacentes, o incluso pueden llegar al torrente sanguíneo y distribuirse por el resto del cuerpo. Además, los ensayos deben validar la seguridad no solo del fármaco, sino también del sistema de encapsulamiento, lo que complica el desarrollo del producto por parte de la industria farmacéutica.

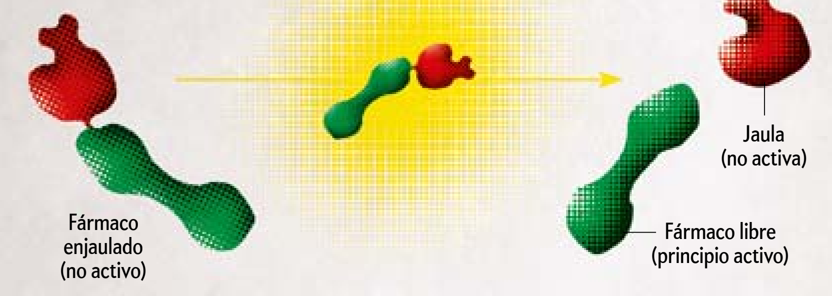
Necesitamos, pues, otra herramienta que nos permita superar la falta de selectividad de la que adolecen los fármacos actuales. Y qué mejor herramienta que la luz, cuya propagación puede restringirse con gran precisión espacial y temporal. Veamos cómo pueden diseñarse fármacos cuya acción sea controlable mediante la luz: nos referimos a los fotofármacos.

CONTROL REMOTO MEDIANTE LUZ

Hay dos tipos de moléculas candidatas a ser fotofármacos: los medicamentos fotosensibles no reversibles y los medicamentos fotosensibles reversibles (o fotoisomerizables). Los primeros (no reversibles) se activan mediante la aplicación de un haz

Fármacos de control remoto

La fotofarmacología se basa en la administración de fármacos fotosensibles (fotofármacos), moléculas cuya actividad terapéutica puede controlarse mediante la luz. Se dividen en dos grandes grupos: los enjaulados (*arriba*) y los fotoisomerizables (*abajo*). Ambos tipos pueden activarse mediante la luz de forma muy precisa en un tejido, una célula o incluso una parte de la célula. Estas son las principales diferencias y características.

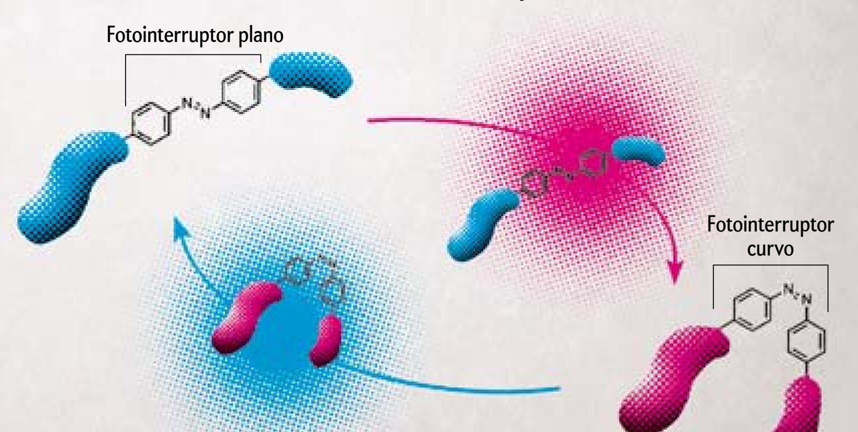


Fármacos enjaulados

- Constan de dos partes: el principio activo y una estructura que opera a modo de «jaula».
- Permanecen inactivos hasta que, por efecto de la luz, se rompen (fotólisis). Se libera entonces el compuesto activo y se desprende la jaula, que suele ser inocua.
- Dado que el proceso es irreversible (no podemos volver a «enjaular» el principio activo), la concentración del fármaco aumentará en la región iluminada en función del tiempo de exposición a la luz y de la difusión del mismo.

Fármacos fotoisomerizables

- Contienen un «interruptor» químico que permite activarlos y desactivarlos.
- Permanecen inactivos hasta que su iluminación con luz de un color determinado provoca un cambio conformacional del interruptor (en este caso, azobenceno), que pasa de adoptar una forma plana a una curva. Se produce, pues, una fotoisomerización.
- Este proceso se revierte espontáneamente con el tiempo o con una luz de otro color. El fármaco es activo solo en una de las dos formas. Puede diseñarse para que su retorno espontáneo a la forma plana sea muy rápido, de modo que la molécula activa se concentre solo en la zona iluminada.



de luz. A los segundos (reversibles), además de activarlos, la luz también puede desactivarlos. Ambos tipos de moléculas tendrán efecto solo donde sean iluminados por una luz de características determinadas. Veamos su mecanismo de acción con mayor detalle.

Los fármacos fotosensibles no reversibles son inicialmente inactivos, hasta que la presencia de luz de una longitud de onda específica provoca que se rompan (fotólisis). Ello da lugar a dos moléculas más pequeñas: una bioactiva, el fármaco, y otra generalmente inocua, que opera a modo de «jaula» (de ahí que en inglés estas estructuras se denominen *caged compounds*, «compuestos enjaulados»). De hecho, se dice que, cuando la parte inocua se halla unida al fármaco, la actividad biológica de este está «enjaulada». Si se produce la liberación del principio activo justo en el lugar donde debe actuar, se consigue la selectividad espacial y temporal deseada. De este modo, puede lograrse la liberación de compuestos bioactivos en la zona de un tumor, por ejemplo, para que estos maten solo las células cancerosas.

Los fármacos fotoisomerizables son más complejos. Contienen en su estructura un interruptor que permite modificar la configuración de la molécula mediante la aplicación de una luz de una longitud de onda determinada, generalmente en el espectro del visible o del ultravioleta cercano. Aunque existe una gran diversidad de fotointerruptores, uno de los más usados es el azobenceno, que adopta una forma plana o curva según el color de la luz que se le aplique.

Dado que la capacidad de unión de un fármaco con su molécula diana depende de la estructura tridimensional del mismo, cualquier cambio en la geometría de este modificará esa afinidad. Por tanto, el fotointerruptor permite controlar, mediante luz, la actividad terapéutica del fármaco.

En general, una de las dos configuraciones es más estable que la otra. Si se espera el tiempo suficiente, la molécula modificará su estructura espontáneamente para adoptar la forma más estable. Este fenómeno se denomina relajación térmica, y el tiempo necesario para que ocurra puede ser muy corto (milisegundos, microsegundos), largo (horas, días) o muy largo (meses, años) en el caso de las moléculas biestables. Ello ofrece una enorme flexibilidad temporal. Si lo que se quiere es un efecto muy localizado, se optará por un fotointerruptor muy rápido. Dado que el fármaco dejará de ser activo en muy poco tiempo, no producirá ningún efecto secundario porque no tendrá tiempo de llegar a otros tejidos u órganos que contengan el mismo tipo de proteínas diana para las cuales ha sido diseñado. Estos compuestos tendrán, por tanto, una gran selectividad de lugar de acción.

Además de ofrecer una selectividad espacial y temporal difíciles de lograr con otros medios, la luz entraña una ventaja adicional: en un amplio espectro de longitudes de onda, es inocua para nuestras células, tejidos y órganos. Con todo, hay que tener en

cuenta que determinadas longitudes de onda sí pueden resultar perjudiciales a partir de ciertas intensidades, especialmente la ultravioleta. Para solventar este problema, se están diseñando fotofármacos controlados por luces menos dañinas, como las verdes, rojas e infrarrojas.

IMPLANTES DE FIBRA ÓPTICA Y LEDES INYECTABLES

La idea de utilizar la luz como herramienta terapéutica no es nueva. Ya hace tiempo que se aplica, por ejemplo, en la terapia fotodinámica. Esta se basa en el uso de moléculas orgánicas fotosensibilizantes, que, en presencia de luz, producen compuestos que resultan tóxicos para las células malignas [*véase* «Porfirinas», por Nick Lane; Investigación y Ciencia, marzo de 2003]. Esta estrategia permite destruir células o tejidos y resulta muy eficaz en el tratamiento de ciertas afecciones de la piel.

Si bien la fotofarmacología se basa en otro enfoque que permite aplicarla a un abanico más amplio de enfermedades, puede aprovechar los métodos de aplicación de luz que se han desarrollado para la terapia fotodinámica, más avanzada en el uso clínico.

Con todo, cuando el foco de la enfermedad se encuentra en sitios inaccesibles, como órganos internos o incluso el cerebro, la aplicación de la luz puede resultar problemática, puesto que los tejidos humanos suelen ser poco translúcidos a la luz visible. En estos casos, hay dos posibilidades en vías de desarrollo. La primera corresponde al uso de moléculas que puedan activarse con luz roja o infrarroja, puesto que es la que mejor penetra en nuestros tejidos, alrededor de 5 milímetros. (Proponemos al lector un experimento: si retroilumina su mano con una luz blanca —la linterna del teléfono móvil servirá—, observará que solo la componente roja atraviesa los dedos.) Aun así, ello nos permitiría alcanzar órganos superficiales, pero no órganos internos como el hígado, el corazón o el cerebro.

Aquí entran en juego los últimos avances en fotónica e ingeniería microelectrónica. Nos referimos a dispositivos como microimplantes de fibra óptica o microledes inyectables, actualmente en desarrollo en laboratorios de microelectrónica de todo el mundo. En este sentido, Ferrucio Pisanello, del Instituto Italiano de Tecnología y fundador de la empresa emergente Optogenix, está desarrollando fibras ópticas cónicas implantables que permiten la aplicación de luz en puntos muy concretos del cerebro. Aunque puedan parecer técnicas inviables en humanos, cabe recordar que una gran cantidad de personas lleva marcapasos implantados en el corazón. Asimismo, la estimulación cerebral profunda se sirve de electrodos implantados en el cerebro para tratar ciertas enfermedades neurológicas mediante el envío de pequeños impulsos eléctricos.

Entre los nuevos métodos de aplicación de luz destacan también los microsistemas optofluídicos implantables ideados por Jae-Wong Jeong, del Instituto de Ciencia y Tecnología Avanzadas de Corea. Estos dispositivos miniaturizados (de menos de 10 milímetros cuadrados) con ledes pueden administrar fármacos en minúsculas cantidades, así como luz de forma controlada mediante un sistema Bluetooth instalado en un teléfono móvil.

PRIMEROS FRUTOS

Varios grupos de investigación en todo el mundo están contribuyendo al avance del nuevo campo de la fotofarmacología. Uno de los exponentes más reconocidos es Ben Feringa, de la Universidad de Groninga. Fue laureado en 2016 con el premio Nobel de química por su desarrollo de máquinas moleculares, algunas de ellas controlables mediante luz, que representaron el prólogo de los fotofármacos. En la actualidad, Feringa está estudiando fotointerruptores distintos del azobenceno y agentes antibióticos y antimicrobianos fotosensibles. Otros importantes investigadores en este campo son Dirk Trauner, de la Universidad de Nueva York, y Ehud Isacoff, de la Universidad de California en Berkeley. Ambos destacan por ser los pioneros en el control de canales iónicos y otras proteínas con compuestos fotoisomerizables basados en el fotointerruptor azobenceno.

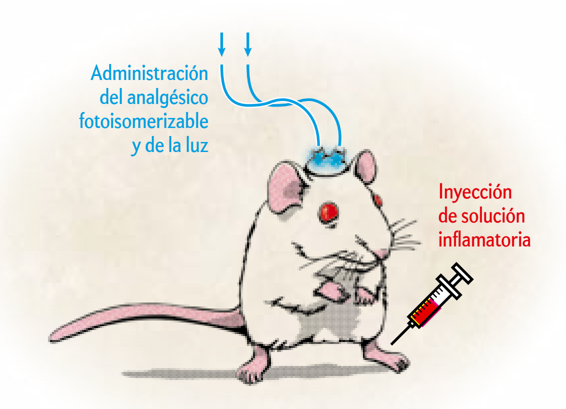
Otro de los expertos en fotofármacos fotoisomerizables es Richard H. Kramer, de la Universidad de California en Berkeley. Su grupo está desarrollando una de las aplicaciones de la fotofarmacología más cercanas al uso en humanos: ha logrado restaurar la visión a animales ciegos. En su trabajo se trataron animales con retinitis pigmentosa, una enfermedad en la que la degradación de los receptores naturales de luz causa invidencia permanente. Mediante la aplicación de compuestos fotoisomerizables que activaban los canales iónicos de las células nerviosas que sobreviven en la retina degradada, lograron que la luz volviera a enviar una señal a través del nervio óptico al cerebro y que este lo pudiera interpretar. La aplicación del compuesto fotosensible logró la restauración de la visión en animales ciegos como si de una prótesis molecular se tratara. Esta técnica podría tener muy pronto uso clínico en humanos. De hecho, Kramer es cofundador (junto con Trauner e Isacoff) de la empresa Photoswitch Biosciences Inc., que afirma encontrarse en el umbral de comenzar ensayos clínicos con este tipo de moléculas.

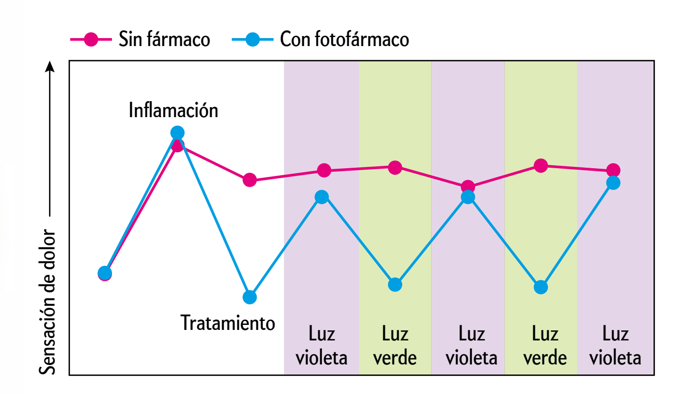
Gran parte de la comunidad de investigadores que se dedican a este incipiente campo se reunió el pasado noviembre en la Universidad de Vic - Universidad Central de Cataluña, en el marco del Segundo Simposio Internacional de Fotofarmacología. Una de las cuestiones que centraron el encuentro, que congregó a expertos provenientes de quince países, fue el desarrollo de terapias más selectivas y seguras para el tratamiento del cáncer. En este sentido, desatacó el trabajo presentado por Edith Glazer, de la Universidad de Kentucky, quien ha desarrollado un método de liberación de fotofármacos en tumores.

Entre los estudios centrados en el tratamiento de enfermedades graves cabe mencionar el trabajo de Cyril Goudet y Jean-Philippe Pin, del Instituto de Genómica Funcional de Montpellier, sobre el dolor crónico. Este se enmarca en un proyecto de colaboración con Amadeu Llebaria, del Instituto de Química Avanzada del CSIC, Pau Gorostiza, del Instituto de Bioingeniería de Cataluña, uno de los autores de este artículo (Rovira) y otros investigadores.

Gracias a unos analgésicos fotoisomerizables sintetizados por otro de nosotros (Gómez), en esta investigación se controló, mediante la aplicación de luz, el dolor crónico en ratones. Para tal fin, se usaron fibras ópticas implantadas en el cerebro, de modo que el foco de luz alcanzaba la amígdala, zona responsable de la integración de la sensación de dolor. La posibilidad de «encender» y «apagar» a voluntad la acción analgésica del fármaco permitió descubrir que la activación de un tipo específico de receptores neuronales en la amígdala aliviaba de forma rápida los principales síntomas físicos y emocionales (depresión) del dolor persistente. Los resultados se publicaron el año pasado en *Molecular Psyquiatry*.

De un modo similar, Francisco Ciruela, de la Universidad de Barcelona, logró controlar el dolor en ratones mediante moléculas fotosensibles no reversibles. Además, también demostró que





CONTROL DEL DOLOR CON UN FÁRMACO FOTOISOMERIZABLE. **La primera demostración de la eficacia de la fotofarmacología en un modelo animal de enfermedad se ha realizado con ratones que sufrían dolor. La investigación pretendía demostrar que un tipo de receptores neuronales en una zona específica del cerebro (amígdala) controlaba el procesamiento del dolor crónico. Se observó que, después de administrar el fármaco fotoisomerizable (tratamiento), el dolor que el animal sufría en la pata (debido a la inyección de una solución inflamatoria) aumentaba o desaparecía en función del color de la luz con la que se iluminaba la amígdala.**

FREEPIK (*ratón*); FUENTE: DYNAMIC MODULATION OF INFLAMMATORY PAIN-RELATED AFFECTIVE AND SENSORY SYMPTOMS BY OPTICAL CONTROL OF AMYGDALA METABOTROPIC GLUTAMATE RECEPTOR 4. POR CHARLEINE ZUSSY ET AL. EN *MOLECULAR PSYCHIATRY*, VOL. 23, N.º 3, PÁGS. 509-520, MARZO DE 2018.

el uso de otros compuestos enjaulados junto con la aplicación de luz en una parte del cerebro de los múridos permite revertir los efectos característicos de la enfermedad de Parkinson con una efectividad mayor que la de los tratamientos al uso.

LA TELEMEDICINA AVANZADA DEL FUTURO

Actualmente se están invirtiendo muchos esfuerzos en el desarrollo de nuevas técnicas que impulsen la monitorización y el tratamiento del paciente de forma personalizada y a distancia. Esto es crucial para la implementación de la telemedicina avanzada, que, a través de dispositivos con sensores y actuadores que permiten detectar parámetros fisiológicos y reaccionar ante situaciones patológicas, permitirá una asistencia médica continuada y un control preciso de la medicación.

La fotofarmacología encaja como anillo al dedo en este enfoque. La combinación de esos dispositivos con fármacos controlados por luz dará lugar a tratamientos personalizadas que actuarán solo en la región del cuerpo seleccionada y solo durante el tiempo necesario. Esta selectividad es impensable con los medicamentos actuales.

Imaginemos una persona con un riesgo elevado de sufrir un ataque cardíaco. En un escenario futuro, podrá llevar una pulsera con un sensor que evaluará continuamente, mediante un electrocardiograma, sus constantes vitales (este tipo de dispositivos ya han sido desarrollados y destacados como una de las diez técnicas de vanguardia de 2019 por el *MIT Technology Review*). Este paciente ya se estará tomando una medicación, pero esta no tendrá ningún efecto sobre su cuerpo hasta que sea activado mediante una luz concreta. Entonces, cuando le sobrevenga una crisis cardíaca, un microled (más pequeño que la cabeza de un alfiler) irradiará la zona apropiada para activar la medicación. El microled estará instalado en una región muy concreta del corazón y se activará automáticamente cuando el sensor detecte una anomalía en las constantes del paciente. Al mismo tiempo, este dispositivo enviará un mensaje al médico para alertarlo de que su paciente acaba de sufrir un ataque cardíaco. Junto con el mensaje, le llegará, además, un informe de todos los parámetros fisiológicos registrados durante los últimos días por el sensor y la dosis de luz administrada.

También se vislumbra el uso de aplicaciones similares para otras enfermedades como la diabetes, que requiere un control instantáneo de los niveles de azúcar en sangre, o el dolor crónico, cuyos pacientes se podrían beneficiar de un tratamiento instantáneo y localizado en una región del cuerpo. La lista de enfermedades que podrían tratarse con este tipo de medicinas inteligentes es larguísima: ceguera, cáncer, infecciones graves, incontinencia, epilepsia, reacciones alérgicas y un largo etcétera.

Este es el panorama que dibujan las nuevas técnicas de automatización de datos en el ámbito de la asistencia sanitaria (*e-health*). En este marco, la fotofarmacología representa un enlace poco agresivo y altamente controlable entre lo electrónico y lo biológico.

Quizá la próxima vez que un ataque de alergia primaveral nos obligue a tomarnos un antihistamínico ya no tendremos que acompañarlo de una dosis de cafeína. No correremos el riesgo de caer en los brazos de Morfeo porque el nuevo fotofármaco actuará solo donde lo necesitamos, sin causar efectos indeseados. IyC

Los autores agradecen el asesoramiento lingüístico de Eva Funoll y Mónica Jofre, del Departamento de Comunicación de la UVic-UCC, y Marta Torné, de martatraduccions.cat

PARA SABER MÁS

Emerging targets in photopharmacology. Michael M. Lerch et al. en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 55, n.º 37, págs. 10978-10999, septiembre de 2016.

In vivo photopharmacology. Katharina Hüll, Johannes Morstein y Dirk Trauner en *Chemical Reviews*, vol. 118, n.º 21, págs. 10710-10747, noviembre de 2018.

Dynamic modulation of inflammatory pain-related affective and sensory symptoms by optical control of amygdala metabotropic glutamate receptor 4. Charleine Zussy et al. en *Molecular Psychiatry*, vol. 23, n.º 3, págs. 509-520, marzo de 2018.

New players in phototherapy: photopharmacology and bio-integrated optoelectronics. Johannes Morstein, Dirk Trauner en *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 17, n.º 50, págs. 145-151, mayo de 2019.



EN EL SOTOBOSQUE, la matamoscas o falsa oronja (*Amanita muscaria*) desarrolla vistosos cuerpos fructíferos. Esta y otras especies afines son hongos ectomicorrícicos que viven en simbiosis con plantas.



BOTÁNICA

Micorrizas: la simbiosis que conquistó la tierra firme

Sin los hongos, la mayoría de las plantas no existirían. A cambio de productos de la fotosíntesis, proveen de nutrientes y protegen a los vegetales. Esta simbiosis se encuentra en el origen de los ecosistemas terrestres actuales

Marc-André Selosse

EN LA ÉPOCA COLONIAL LOS EUROPEOS INTENTARON CULTIvar pinos en América del Sur y en África para fabricar mástiles de barcos. Pero los piñones sembrados no prosperaban: las plántulas vegetaban y acababan muriendo, o sobrevivían sin crecer. Vigorosas en el hemisferio norte, parecían incapaces de medrar en los trópicos. Entonces se descubrió que si se plantaban en suelo traído de Europa, los jóvenes árboles reanudaban su crecimiento: sin saberlo, se acababan de introducir los hongos europeos en los trópicos.

La supervivencia de la mayoría de las plantas depende efectivamente de los hongos, hasta el punto de que los pinos, acompañados de sus hongos, se han convertido en invasores en los trópicos. Esta asociación de mutuo beneficio es antiquísima: tiene más de 400 millones de años. Investigaciones genéticas y paleontológicas permiten ahora conocer la evolución de esta simbiosis hongo-planta.

Todo empezó en el Precámbrico (hace más de 541 millones de años), en las delgadas comunidades de microbios que tapizaban la superficie de las rocas. En el seno de esas biopelículas, cuya existencia confirman los microfósiles, algunas microalgas y bacterias fotosintéticas servían de alimento a bacterias heterótrofas. Estas biopelículas se desarrollaron en la interfaz del aire con el suelo, donde accedían, por una parte, a los gases y la luz y, por otra, a los recursos minerales. Sin embargo, la biomasa así formada era muy limitada.

Luego, en el Ordovícico (hace entre 485 y 443 millones de años), grandes algas emergieron de las aguas. Sumergida, un alga encuentra al mismo tiempo la luz, los gases (sobre todo dióxido de carbono, o CO_2) y las sales minerales (nitrato, fosfato, etcétera) que precisa para su alimentación. Aunque desprovista de raíces, puede aferrarse a las rocas del fondo. En cambio, la supervivencia en tierra firme exige la adaptación a un medio cuyos recursos están compartimentados: los gases y la luz en el aire; el agua y los minerales en el suelo, y, además, con frecuencia son escasos.

Se sabe que las algas que tomaron esa senda adaptativa salieron del agua dulce porque sus parientes actuales, las caráceas (una familia de algas verdes) o las espirogiras (algas verdes filamentosas), aún viven en ella. Para datar esta adaptación, Philip Donoghue y su equipo, de la Universidad de Bristol, contaron en 2018 las mutaciones acumuladas con el tiempo en estos linajes, desde el ancestro común. Este método, el llamado reloj molecular, ha datado la divergencia entre las algas y las plantas terrestres hace unos 500 millones de años.

Una vez en tierra, las plantas primigenias comenzaron a generar mucha más biomasa gracias a la explotación de los recursos del suelo. ¿Cómo llegaron allí? Gracias a su alianza con los hongos. Lamentablemente, carecemos de los fósiles de aquellas pioneras para obtener más detalles: los más antiguos consisten solo en algunas viejas células reproductoras de hace 470 millones de años, unas esporas.

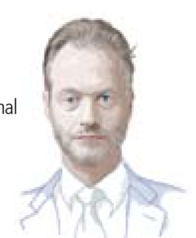
Los fósiles vegetales más antiguos que se conservan datan solo del Devónico (hace entre 419 y 359 millones de años) y fueron descubiertos en Rhynie, Escocia. Allí, unos 400 millones de años antes de que surgiera ese bonito pueblo, la repentina precipitación de aguas hidrotermales saturadas de sílice, que manaron de la ladera de un volcán, petrificó vivas unas plantas. Milagro de la conservación, desde entonces no se han deformado ni alterado, por lo que es posible observar sus órganos fijados. En aquella época remota carecían de raíces y solo poseían tallos rastreros, cuyos tejidos periféricos albergaban filamentos de hongos (hifas) que penetraban en ciertas células al ramificarse. La forma redondeada de las células indica que cuando fosilizaron estaban vivas. Por lo tanto, los hongos del suelo colonizaban los tejidos vegetales ya entonces. Se cree que aportaban agua y sales minerales, exactamente como lo hacen hoy en día. Las plantas lograron colonizar el medio terrestre gracias a su simbiosis con ellos.

SUBCONTRATISTAS DE LAS PLANTAS

¿Con qué hongos? Muy diversa, la interacción planta-hongo se da hoy en el 90 por ciento de la flora vegetal. Las raíces colonizadas por los hongos forman un órgano mixto llamado «micorriza» (del griego antiguo *myco*, «hongo», y *rhize*, «raíz»). El tipo más antiguo está formado por hongos glomeromicetos (de *glomero*, «pelota», y *myco*, «hongo»). Probablemente ya eran micorrizas las que se asociaron con las plantas de Rhynie. Sin embargo, trabajos recientes de Christine Strullu-Derrien, actualmente en mi equipo del Museo de Historia Natural de París, sugieren que quizá también intervino un grupo cercano a los anteriores, los mucoromicetos, que colonizan ciertas plantas actuales. Sea como fuere, el hecho de que más del 80 por ciento de la flora actual esté asociada con glomeromicetos es un indicador de la antigüedad de esta simbiosis. Sus socios son muy diversos: desde las hepáticas, pequeñas plantas rastreras, hasta las plantas con flores o angiospermas, pasando por los helechos.

Los glomeromicetos colonizan las raíces creando en el interior de las células unas pequeñas estructuras arbóreas llamadas arbúsculos intracelulares. Las plantas fósiles de Rhynia ya las alojaban en su seno.

Los hongos explotan el suelo, también para la planta. ¿Cómo lo hace? En 2017, dos consorcios de investigadores, uno chino y otro inglés, demostraron que, a cambio de los recursos minerales del suelo (agua, nitrógeno, fósforo y potasio), el vegetal les suministra azúcares, pero también ácidos grasos. La forma filamentosa del hongo le permite deslizarse entre los obstáculos con un coste mínimo: para la misma longitud, la biomasa que representa un filamento de hongo es 100 veces menor que la de una raíz fina. Estos filamentos, las hifas, exploran grandes extensiones de suelo, multiplicando el volumen de tierra explotada para extraer en especial los minerales poco móviles, como el fosfato. Esta externalización reduce drásticamente el coste biológico que la extracción de los minerales impone a la planta, mientras que libera al hongo de la tarea de obtener azúcares. Esta alianza entre hongos y vegetales no se limita a



Marc-André Selosse es micólogo, botánico y profesor del Museo Nacional de Historia Natural de París.

EN SÍNTESIS

Desde hace más de 400 millones de años, las plantas y los hongos se prestan servicios que son cruciales para ambos.

El 50 por ciento de la flora se asocia a hongos ectomicorrícicos, que rodean las raíces con un manto.

El 80 por ciento de las plantas incorpora glomeromicetos, que penetran en las células radiculares, donde forman arbúsculos.

Los glomeromicetos hicieron posible la colonización de la tierra firme por las algas, hace unos 450 millones de años, al ayudarlas a explotar el suelo.

La agricultura sustituye con fertilizantes los aportes de los hongos.





LAS HIFAS son finos filamentos que constituyen el aparato vegetativo del hongo. A la izquierda, las de un glomeromiceto en asociación micorrícica con una planta salen de una raíz, a cuyo alrededor producen una especie de pelusa; estas hifas también forman esporas redondas. Arriba, las del hongo ectomicorrícico *Scleroderma bermudense* recubren completamente una raíz muy ramificada de un pino de China.

la nutrición, pues también está en juego la protección mutua. Las plantas albergan las reservas de algunos glomeromicetos: estos almacenan lípidos dentro de las raíces, en el interior de vesículas formadas por la dilatación de un filamento. En contraste, las plantas desprovistas de hongos son más vulnerables a los parásitos, lo que no se explica solo por la insuficiente asimilación de nutrientes, sino por la protección directa que estos brindan (a ellas y, por ende, a sus propios recursos), en forma de toxinas y antibióticos. Al envolver las raíces, crean asimismo una pantalla. Pero ante todo, en el aspecto defensivo, el hongo mejora la reactividad del sistema inmunitario vegetal. En 2005, María Pozo, de la Universidad de Granada, demostró que los órganos de la planta micorrizada perciben mejor las señales de alerta, especialmente el jasmonato, una hormona vegetal segregada por los tejidos dañados. Más rápidas y potentes en presencia de los hongos, las defensas vegetales logran más a menudo rechazar a los patógenos. Este efecto se manifiesta en todo el vegetal, ya que la planta micorrizada se defiende mejor contra los herbívoros o los hongos parásitos de las hojas, lejos de las raíces.

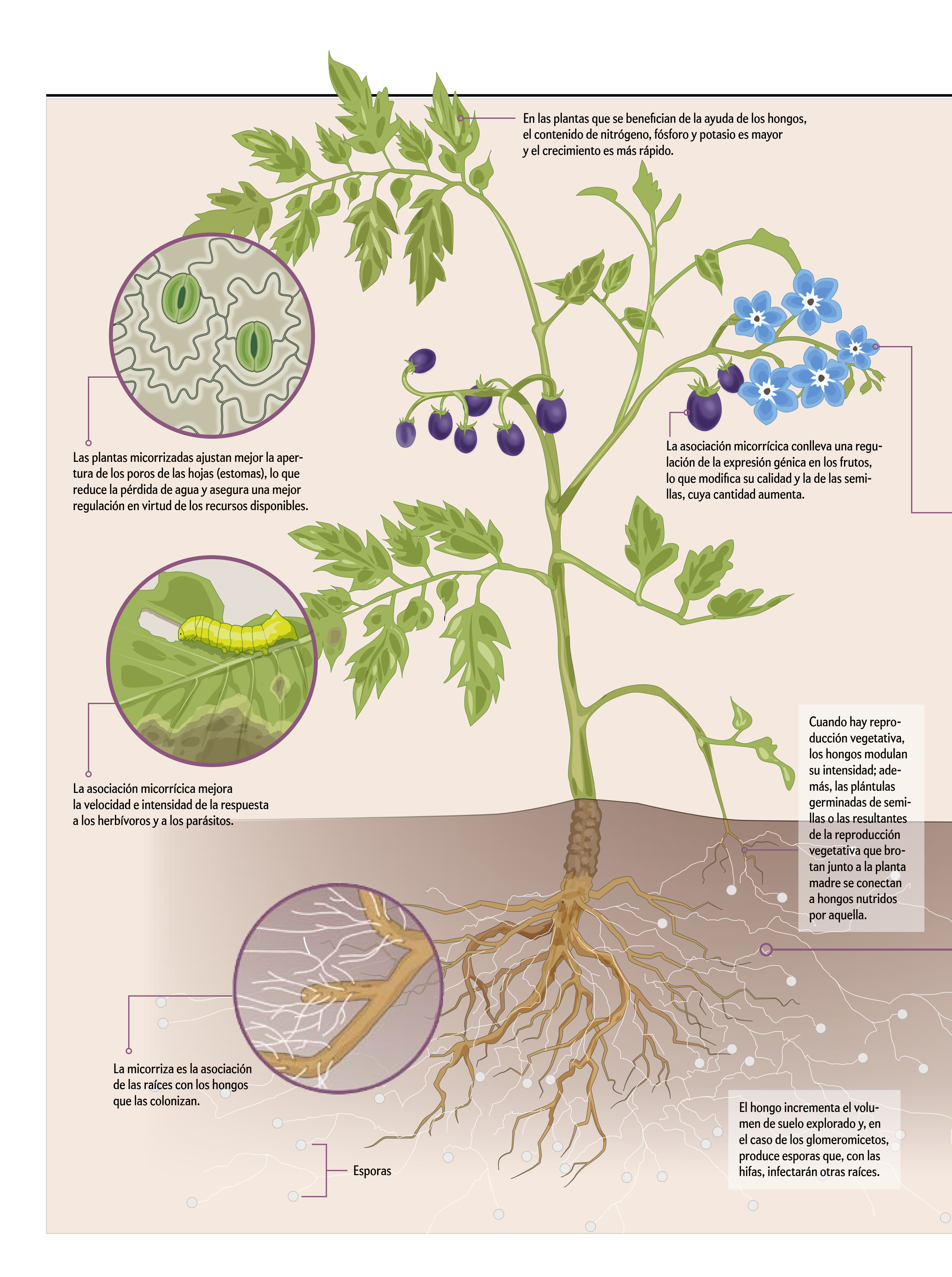
De manera progresiva, la relación simbiótica entablada con los glomeromicetos propició la diversificación de una flora parecida a la que conocemos. A partir del Devónico, proliferan los licopodios, las colas de caballo y los helechos, que formarán las gruesas capas de carbón del Carbonífero (hace entre 359 y 299 millones de años). En la década de 2000, Michael Krings, de la Universidad de Múnich, demostró, a partir de fósiles contenidos en carbón, que la flora del Carbonífero se asoció con los antepasados de los glomeromicetos actuales. Este hecho había pasado desapercibido hasta entonces, porque los micólogos no se dedican a examinar fósiles... del mismo modo que los paleontólogos no buscan hongos en los yacimientos.

El aporte de recursos minerales del suelo que trajo consigo la simbiosis pronto se vio facilitado por la aparición de ejes subterráneos: las raíces, que se aventuran en el suelo y multiplican la superficie de intercambio con los hongos. Aparecida a lo sumo hace 360 millones de años, la raíz no tiene como única función anclar la planta en el suelo: facilita la instalación de los hongos dando pie a auténticas micorrizas. Sin duda se impuso por este motivo.

Otra consecuencia trascendental de la simbiosis hongo-planta es que la materia orgánica acumulada por la fotosíntesis de la vegetación terrestre aumentó la concentración de oxígeno en la atmósfera. Esto abrió la posibilidad de incendios, ya que estos se mantienen solo si la proporción de este elemento en la atmósfera supera el 16 por ciento (actualmente ronda el 21 por ciento). Antes de alcanzar ese valor, los primeros incendios se extinguían por falta de oxígeno. Desde entonces el fuego pasó a desempeñar un papel destacado en los ecosistemas, que perdura hoy en día.

Mejor alimentados por las plantas, los hongos ganaron en capacidad para desmenuzar las rocas. Las raíces y los filamentos fúngicos retuvieron los fragmentos resultantes, junto con los restos orgánicos de la descomposición de la vegetación. Así nació otra de las grandes obras de la simbiosis planta-hongo: un suelo verdadero, esa mezcla de rocas erosionadas y restos vegetales que apenas se formó o conservó bajo las biopelículas precámbricas.

La estructuración de los ecosistemas terrestres tuvo una consecuencia climática importante: la caída de la concentración atmosférica de dióxido de carbono. Bajo el intenso ataque de los hongos, las rocas liberaron cantidades crecientes de minerales que la escorrentía condujo hasta el mar. Entre esos minerales, el calcio y el magnesio se combinan con el ion carbonato (CO_3^{2-}), cuya concentración marina permanece en equilibrio con la concentración atmosférica de CO_2. El aumento de la sedimentación calcárea atrapó masivamente el CO_2 y, junto con la fotosíntesis terrestre, contribuyó a empobrecer la atmósfera en ese gas, lo



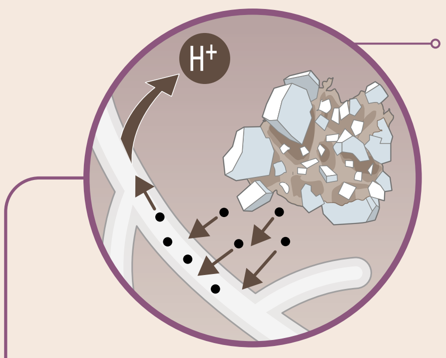
En las plantas que se benefician de la ayuda de los hongos, el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio es mayor y el crecimiento es más rápido.
Las plantas micorrizadas ajustan mejor la apertura de los poros de las hojas (estomas), lo que reduce la pérdida de agua y asegura una mejor regulación en virtud de los recursos disponibles.
La asociación micorrícica conlleva una regulación de la expresión génica en los frutos, lo que modifica su calidad y la de las semillas, cuya cantidad aumenta.
La asociación micorrícica mejora la velocidad e intensidad de la respuesta a los herbívoros y a los parásitos.
Cuando hay reproducción vegetativa, los hongos modulan su intensidad; además, las plántulas germinadas de semillas o las resultantes de la reproducción vegetativa que brotan junto a la planta madre se conectan a hongos nutridos por aquella.
La micorriza es la asociación de las raíces con los hongos que las colonizan.
Esporas
El hongo incrementa el volumen de suelo explorado y, en el caso de los glomeromicetos, produce esporas que, con las hifas, infectarán otras raíces.

LA SIMBIOSIS AL DETALLE

La micorriza de una planta con flor

El dibujo representa una planta angiosperma que, como el 80 por ciento de los vegetales, vive en simbiosis con glomeromicetos, hongos cuyos filamentos (las hifas) pueden extraer los minerales del suelo. Otros vegetales, los pinos entre ellos, acogen comunidades de hongos ectomicorrícicos que, además de extraer los minerales, aprovechan los restos orgánicos que el suelo contiene. La raíz colonizada por los hongos forma la micorriza, órgano mixto que dota de nutrientes a la planta y al hongo. En el caso de los glomeromicetos, el intercambio tiene lugar en estructuras constituidas por las hifas en el interior de las células radiculares: los arbúsculos. En la superficie de estos, el hongo recibe azúcares y la planta obtiene a cambio el agua y las sales minerales que el primero extrae lejos de allí, gracias a sus hifas. En las ectomicorrizas, el intercambio tiene lugar en la superficie de la raíz, que el hongo envuelve con un manto.

La asociación micorrícica favorece la floración y la producción de néctar, y de ese modo una mejor reproducción sexual.



El hongo disuelve los minerales del suelo al acidificarlo localmente y así adquiere fósforo y potasio; este mecanismo es aún más activo en los hongos ectomicorrícicos.



Gracias a las enzimas, el hongo moviliza el nitrógeno y el fósforo en los restos orgánicos presentes en el suelo. Este mecanismo es especialmente activo en los hongos ectomicorrícicos.

BRUNO BOURGEOIS

que redujo el efecto invernadero. Los modelos construidos en esta última década por Timothy Lenton, de la Universidad de Exeter, sugieren que la alteración de las rocas por la simbiosis planta-hongo explicaría el 80 por ciento de la caída de la concentración atmosférica de CO_2 acaecida con la colonización de la tierra firme por las algas, hace unos 500 millones de años. La disminución del efecto invernadero culminó hace unos 460 millones de años, con la gran glaciación del Ordovícico. La aceleración de la alteración de las rocas y de la fotosíntesis también habría contribuido a otra glaciación hacia finales del Devónico (hace 359 millones de años). Ambas vinieron acompañadas de extinciones masivas de especies.

OTRAS MICORRIZAS

Si bien la mayoría de las plantas han conservado las micorrizas con glomeromicetos, también aparecieron nuevos tipos, en particular las ectomicorrizas (del griego *ecto*, «por encima»), en las que el hongo envuelve la raíz con un manto y penetra en sus células superficiales. Estas ectomicorrizas eran precisamente el elemento ausente en los pinos plantados por los colonos europeos en los trópicos. Estos nuevos tipos comprenden hongos ascomicetos y basidiomicetos, cuyos ancestros eran saprófitos, esto es, se alimentaban de materia orgánica en descomposición. Muchos siguieron siéndolo, en tanto que otros se convirtieron en micorrizas.

Los hongos ectomicorrícicos comprenden varios grupos de ascomicetos (las trufas o ciertas pezizas) y de basidiomicetos. Estos últimos incluyen los hongos dotados de esporóforos, órganos carnosos productores de esporas, como los formados por un pie y un sombrero o píleo que crean las esporas en láminas o tubos. Se trata del órgano que comúnmente llamamos «seta» y que incluye las amanitas, los níscalos, etcétera.

Las ectomicorrizas fósiles más antiguas que se conocen tienen 50 millones de años, pero habrían aparecido mucho antes, al menos en el Triásico (252 a 201 millones de años), con las coníferas. Además de los primeros pinos, una quincena de linajes de plantas con flor adoptaron, de manera independiente, la ectomicorriza, en especial algunas leguminosas (como las acacias) o fagáceas de nuestros bosques (hayas, robles, castaños, etcétera). Por parte del hongo, varios grupos de ascomicetos y basidiomicetos se convirtieron en ectomicorrícicos; algo que sucedió más de 80 veces de forma independiente. Se trata, pues, de una convergencia evolutiva múltiple que culminó en un conjunto de socios compatibles entre sí.

La mayoría de los grupos ectomicorrícicos actuales surgieron hace menos de 60 millones de años, especialmente después del gran enfriamiento climático que marca la transición del Eoceno al Oligoceno, hace 34 millones de años. Dos razones apuntan a una relación de las plantas ectomicorrízicas con ese enfriamiento. En primer lugar, estos hongos han conservado como herencia de sus ancestros saprófitos la facultad de movilizar el nitrógeno y el fósforo de la materia orgánica, lo que favorece la alimentación en los climas fríos, donde esa materia se degrada más lentamente. En segundo lugar, su mayor capacidad para disgregar las rocas compensa la menor disolución de los minerales a temperaturas bajas. En contrapartida, suponen para la planta hospedadora un coste en azúcares entre dos y tres veces mayor, lo que explica por qué las ectomicorrizas no dominan en todos los ambientes.

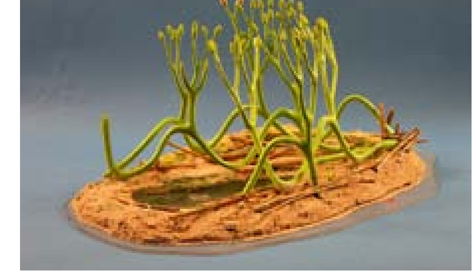
La mayor capacidad de las ectomicorrizas para alterar el sustrato rocoso acrecentó aún más el secuestro de CO_2 en forma de carbonatos que se sedimentaron en el fondo del mar. Este

Fósil

Actual

Hifa, vesículas

Arbúsculos



LAS SIMBIOSIS CON MICORRIZAS ARBUSCULARES existen desde los orígenes de la flora terrestre (*a la izquierda, fósil de 400 millones de años de antigüedad*) y predominan en la actualidad (*a la derecha, una raíz de maíz*). En ambos casos, se observan los filamentos del hongo (hifas) que penetran en ciertas células y se ramifican para formar los llamados arbúsculos o protuberancias (vesículas), órganos que almacenan reservas. El fósil corresponde a *Aglaophyton major*, una de las plantas terrestres más antiguas, y se descubrió en Rhynie, Escocia. Carente de hojas y raíces, sus tallos rastreros albergaban filamentos fúngicos. Investigadores de la Universidad de Aberdeen han recreado su forma (*abajo a la derecha*).

fenómeno enfrió de manera duradera el clima y culminó en las numerosas glaciaciones de los últimos millones de años.

LAS MICORRIZAS CAMBIAN EL ASPECTO DE LA TIERRA

De ese modo, las micorrizas han modelado los ecosistemas terrestres del presente. En el pasado remoto, las algas grandes no podían colonizar la tierra firme. A lo largo de la historia evolutiva que siguió a esta colonización, la flora terrestre continuó su diversificación, en ocasiones con nuevas micorrizas, en otras rompiendo el vínculo con los hongos. Este es el caso de los musgos, que se limitan a la superficie del suelo y resisten la sequía, a costa de un crecimiento limitado. Otras plantas optaron por explotar el suelo de forma autónoma, gracias a sus raíces. Entre otras, las especies de las familias de la quinoa (quenopodiáceas), de la acedera (poligonáceas) o del repollo (brasicáceas) prescinden de las micorrizas. Trabajos recientes de Jean-Michel Ané, de la Universidad de Madison, en Wisconsin, demuestran que han perdido los genes que permiten la formación de las micorrizas con glomeromicetos. Una de ellas es *Arabidopsis thaliana*, la planta modelo más habitual en los laboratorios. Su estudio intensivo ha infravalorado durante mucho tiempo la importancia de los hongos para el mundo vegetal. Las plantas sin micorrizas apenas representan alrededor del 10 por ciento del total y se limitan básicamente a ciertos ambientes, como suelos ricos o húmedos, en que el acceso a los recursos minerales no plantea dificultad, o a entornos pioneros en que los hongos están ausentes.

Para persistir tanto, la simbiosis planta-hongo ha tenido que ser estable. Con el tiempo, seguramente aparecieron los «tramposos», es decir, los hongos o las plantas menos generosos con sus socios. Al economizar sus recursos, estos tramposos debieron de reemplazar gradualmente a los individuos que eran más pródigos. Algunas observaciones indican que tales tramposos existen: según la especie de hongo micorrízico presente, una misma planta crece mejor o peor que si no estuviera micorrizada. Por lo tanto, ¿cómo es que tal asociación ha sido tan a menudo beneficiosa?

En la Universidad Libre de Ámsterdam, Toby Kiers ha demostrado que una planta enfrentada en condiciones in vitro a dos hongos, uno de los cuales puede suministrarle fosfato y el otro no, compartirá sobre todo sus recursos con el primero. Y viceversa, un hongo en contacto con las raíces de dos plantas,

Genética de las micorrizas

La secuenciación genómica de los hongos ectomicorrícicos explica cómo aparecieron las ectomicorrizas. Descifradas principalmente por Francis Martin, del Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Nancy, las secuencias revelan dos cosas. Por una parte, el hongo perdió los genes de las enzimas que permitían a sus antecesores no micorrícicos digerir la materia vegetal (por lo que pasó a depender de la planta, que le aporta los azúcares); por la otra, adquirió numerosos genes que codifican pequeños péptidos de secreción, algunos de los cuales mejoran la tolerancia del tejido radicular a la colonización. Puesto que esta se consuma fácilmente, dicha regresión genética explica sin duda las frecuentes apariciones y reapariciones de grupos de hongos ectomicorrícicos a lo largo de la evolución. También explica por qué, en esos grupos, ninguna especie ha regresado a la vida libre, como saprófito, pues necesitaría muchos de los genes perdidos.

de las cuales solo una puede suministrarle carbono, cederá fosfato preferentemente a esta. En aquellos suelos en que es posible elegir con quién se asocia uno, se tiende a entrar en intercambio con aquellos que son favorables. Hacer trampa no sale a cuenta, porque quien da menos recibe menos: los altruistas son seleccionados por mecanismos que les brindan un mejor acceso a los recursos. En cuanto a las plantas y los hongos incapaces de hacer efectiva esa reacción fisiológica que asegura los mejores socios, sencillamente deben de haber desaparecido.

¿Y LAS PLANTAS CULTIVADAS?

Cuando el suelo es rico, las plantas son poco micorrizadas o no lo son en absoluto. Capaces de alimentarse por sí solas, se ahorran el coste de compartir: la subcontratación puede cesar en cualquier momento. Sin embargo, los suelos agrícolas siempre han recibido aportes, por ejemplo de estiércol, que han enriquecido y mejorado la nutrición de los cultivos. La agricultura occidental moderna aporta masivamente fosfato, nitrógeno y potasio en forma de abono mineral. Esta técnica es problemática, pues si bien favorece la nutrición vegetal y, por ende, la alimentación de la humanidad, acarrea un coste ecológico y económico excesivo. Los fertilizantes contaminan las aguas dulces (donde va a parar una parte de ellos) y son caros. Además, hemos visto que las micorrizas protegen a la planta: cuantas menos posea, más sensible a los patógenos y más dependiente de los plaguicidas será. Los campos abonados producen, pues, plantas más frágiles, que hay que proteger, con la consiguiente repercusión en los hongos micorrizógenos del suelo y la acumulación de plaguicidas en nuestros alimentos.

¿Sería concebible una agricultura «micorrízica», con insumos reducidos gracias a cepas de hongos protectores? Sin duda. La meta no radicaría en suprimir los fertilizantes, sino en reducir su uso. Puesto que el cultivo extrae nitrógeno, fosfato y potasio del suelo, es preciso aportar estos elementos nutritivos. Lo que se pretende es renovar las reservas en pequeñas dosis que no «se escapen» hacia los ecosistemas vecinos: a través de sus hongos micorrízicos, las plantas explotarían las mínimas reservas minerales, aprovechando al mismo tiempo los efectos protectores de la simbiosis.

En los ecosistemas poco ricos, las especies micorrizadas ofrecen soluciones interesantes, que amortizan el sobrecoste que supone la inoculación del hongo en sus raíces. En el campo de la silvicultura, los árboles inoculados en viveros crecen con más vigor y rapidez, en particular en los suelos agrícolas agotados, desprovistos de ectomicorrizas. El Instituto Nacional de Investigación Agronómica (INRA) de Francia ha patentado plantones de abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) inoculados con *Laccaria bicolor*, que crecen más rápido. En los suelos forestales pobres, estas asociaciones funcionan bien, con incrementos de hasta el 50 por ciento en el volumen de madera en el caso de esta conífera.

En cambio, la aplicación de las micorrizas en los suelos agrícolas enriquecidos con abonos resulta problemática. La riqueza mineral que caracteriza a estos suelos limita inicialmente el interés y la estabilidad de la inoculación, pues la planta es capaz de nutrirse por sí sola. Además, las variedades actuales se han seleccionado para estos suelos ricos y no se ha promovido por selección ni su respuesta al hongo ni su capacidad para evitar las trampas. La agricultura con micorrizas requerirá una nueva selección de variedades de cultivo. También será necesario probar las parejas hongo-vegetal, su estabilidad y su eficacia en el campo, diseñar protocolos técnicos adaptados, etcétera. A mi juicio, este cambio, que exigirá un aporte selectivo de minerales a los suelos, nuevas variedades y nuevos protocolos agrotécnicos, debería explorarse con más convicción que hasta ahora.

La importancia de los hongos para las plantas coincide con la toma de conciencia general de que los macroorganismos solo prosperan en simbiosis con multitud de microbios a los que atraen y acogen. Así como nosotros vivimos con nuestra microbiota, las plantas surgieron y evolucionaron en conjunción con los hongos y no viven tan bien sin ellos. Mejorar nuestra comprensión acerca de la interacción micorrízica, así como de las posibilidades de mejora, constituye un problema agronómico importante a medio plazo. Sin duda, debemos volver a explotar estos mecanismos, que han mantenido la flora terrestre desde hace 400 millones de años. IyC

PARA SABER MÁS

La symbiose mycorhizienne: une association entre les plantes et les champignons. J. Garbaye, Quae, 2013.
Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present and the future. M. G. van der Heijden et al. en *New Phytologist*, vol. 205, págs. 1406-1423, 2015.
Jamais seul: ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. M.-A. Selosse, Actes Sud, 2017.
The origin and evolution of mycorrhizal symbioses through the lens of palaeomycology and phylogenomics. C. Strullu-Derrien et al. en *New Phytologist*, en línea, 24 de marzo de 2018 (doi: 10.1111/nph.15076)
Sous la forêt. Francis Martin, *HumenSciences*, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Micorrizas. C. Azcón Gonzáles y José Miguel Barea en *IyC*, agosto de 1980.
Transferencia de nutrientes. Jesús Pérez Moreno en *IyC*, abril de 2005.
Genética de la simbiosis micorrícica. Minna J. Kemppainem y Alejandro G. Pardo en *IyC*, marzo de 2011.
Unos comensales melindrosos. Carrie Madren en *IyC*, julio de 2012.
Tierra prodigiosa. Richard Coniff en *IyC*, noviembre de 2013.

¿Cómo se engrosa un tronco?

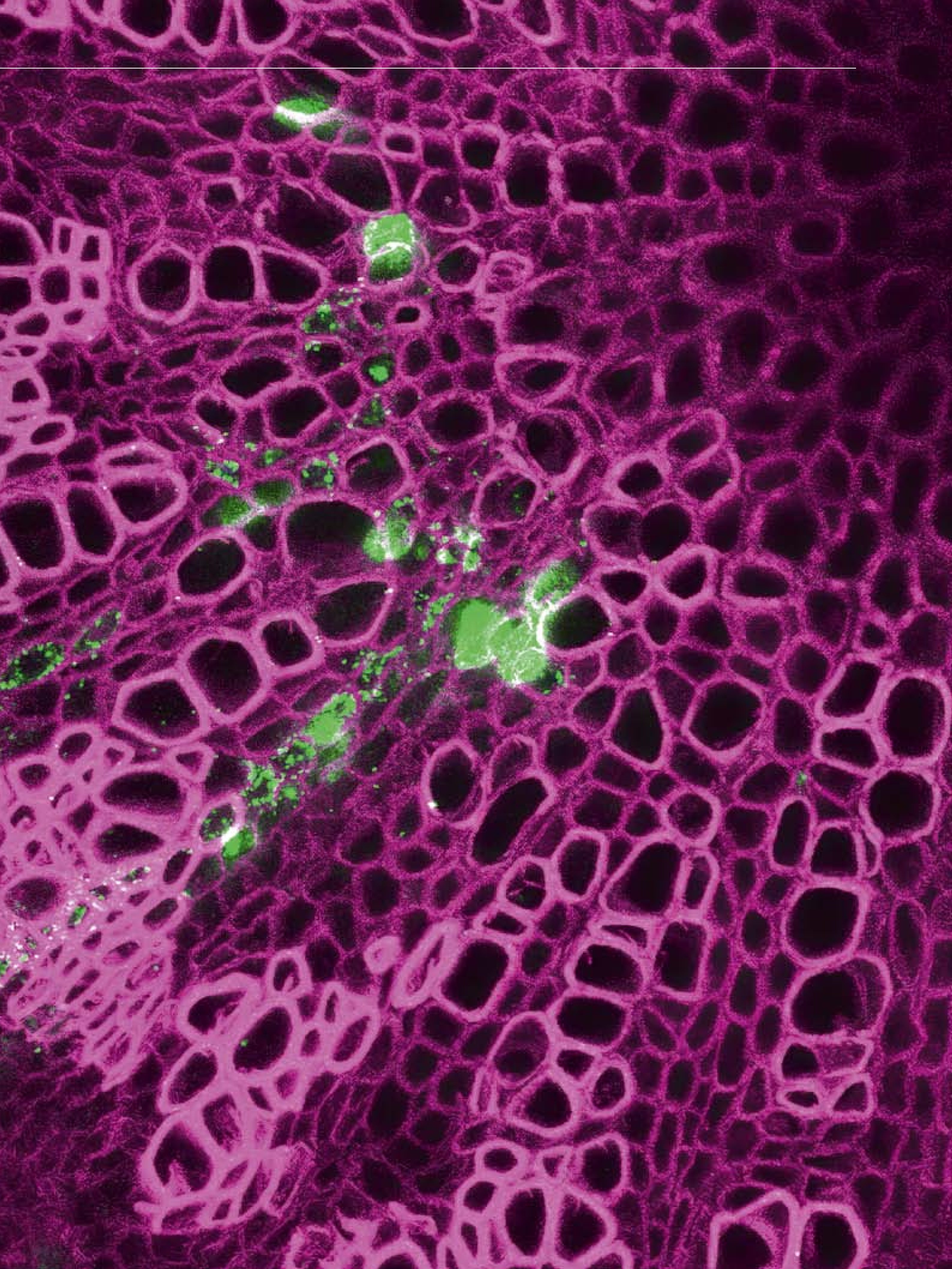
Una capa de células madre produce a la vez células del xilema hacia el interior y del floema hacia el exterior

Para que puedan crecer a lo alto, soportar su propio peso y suministrar nutrientes a los órganos, los árboles deben desarrollar ramas y troncos gruesos. Todo ello lo logran con ayuda del llamado crecimiento secundario. Un equipo de investigación dirigido por Thomas Greb, de la Universidad de Heidelberg, ha aportado más detalles sobre el proceso.

El denominado cámbium, una capa de células que se dividen y se multiplican con rapidez, es el responsable del engrosamiento de las plantas. Se sitúa entre la región leñosa, en el interior del tallo (el xilema, los vasos que transportan la savia bruta) y la región del líber, en el exterior (el floema, los vasos que transportan la savia elaborada). Con el objetivo de averiguar qué ocurre con las células recién formadas, el equipo de Greb ha llevado a cabo unos experimentos con brotes de *Arabidopsis thaliana*, el principal organismo de referencia para los fitobiólogos. En sus experimentos, los científicos modificaron genéticamente las células del cámbium para que sintetizaran proteínas fluorescentes que emitieran luz bajo unas condiciones adecuadas de excitación luminosa. Al dividirse, las células modificadas transferían su capacidad de fluorescencia a las células hijas. Tras dejar crecer el brote durante unos días, los investigadores examinaron secciones transversales del tallo. En ellas se apreciaban células fluorescentes —es decir, descendientes del cámbium— tanto en la región leñosa (*página derecha*) como en el líber (*izquierda*): dibujaban dos bandas verdes que atravesaban el paisaje celular (*lila*). Por tanto, en el tronco, las células del cámbium ceden sus células hijas a ambos tejidos, es decir, producen tanto madera como líber.

La redacción

BIFACIAL CAMBIUM STEM CELLS GENERATE XYLEM AND PHLOEM DURING RADIAL PLANT GROWTH. DONGBO SHI ET AL. EN *DEVELOPMENT*, ART. N.º 10.1242/DEV.171355, ENERO DE 2019. CORTESÍA DE THOMAS GREB, UNIVERSIDAD DE HEIDELBERG (*foto*)



por Fernando Martínez Manrique



Fernando Martínez Manrique es profesor titular de filosofía de la ciencia en la Universidad de Granada.

Los pilares de la mente

La filosofía de la psicología reflexiona sobre los fundamentos de la cognición a la luz de los estudios empíricos

Si uno acude a una biblioteca en busca de materiales de filosofía de la psicología, los encontrará en una subsección dentro de «Filosofía especial de la ciencia», cerca de las filosofías de la biología o de la física. Mientras la filosofía general de la ciencia se encarga de cuestiones comunes a toda la ciencia, la especial se ocupa de los problemas específicos que surgen en el seno de cada disciplina. Sin embargo, la filosofía de la psicología tiene un par de características que la hacen, si cabe, más especial todavía. Una tiene que ver con el lugar de la psicología dentro de las ciencias cognitivas; la otra deriva de su relación con la filosofía de la mente.

La interdisciplinariedad de las ciencias cognitivas

La psicología estudia la mente y la conducta. Pero no es la única ciencia que lo hace. La neurociencia, la inteligencia artificial, la lingüística o la propia filosofía son otras tantas disciplinas que tratan de comprender los fenómenos mentales. Hacer filosofía de la psicología implica, en parte, entender las relaciones de la psicología con otras ciencias cognitivas.

En este sentido, una cuestión muy debatida es si la psicología se halla sujeta a constricciones procedentes de esas otras disciplinas o si es autónoma. Por ejemplo, ¿cuáles son las relaciones de la psicología científica con la psicología de sentido común y la neurociencia?

Producimos explicaciones psicológicas a diario: cuando decimos que el asesino de Lennon deseaba notoriedad y creía que su acto se la daría, estamos describiendo un hecho en términos psicológicos, como deseos y creencias. Al ponderar si estas nociones son adecuadas para figurar en las explicaciones de la psicología científica, los filósofos se debaten entre el realismo y el eliminativismo. Los abanderados del primero, como el (fallecido en 2017) catedrático de la Universidad Rutgers Jerry Fodor, consideran que los estados y procesos que figuran en la psicología científica se corresponden con aquellos de los que habla la psicología cotidiana. Dicho de otro modo, que los deseos y creencias de los que habla la psicología cotidiana son entidades reales. Por el contrario, los partidarios del eliminativismo, como Paul Churchland, de la Universidad de California en San Diego, aducen que tales conceptos son constructos ilusorios y que no tienen lugar en las explicaciones científicas, de las cuales han de ser eliminados.



GETTY IMAGES/PRESSUREUA/ISTOCK

Esta última tesis se apoya en una concepción reduccionista de la relación entre lo psicológico y lo biológico: los constructos psicológicos deben tener su correspondiente correlato neurológico. Si no lo tienen (como sería el caso de las creencias o los deseos), podemos prescindir de ellos. Ahora bien, el debate resulta demasiado genérico si no atendemos al modo en que se construyen las explicaciones psicológicas. En numerosas ocasiones, se mezclan y amalgaman en ellas términos de niveles diversos. Así, cuando se explica una determinada función mental en términos de mecanismos, la neurociencia cognitiva combina terminología biológica y psicológica; o cuando se formula un modelo de procesamiento del lenguaje, se toman prestados conceptos de la lingüística. No parece, pues, que lo psicológico se pueda reducir, sin más, a lo biológico, pero tampoco sería acertado afirmar una completa autonomía de lo primero respecto de lo segundo. La pujanza de estos enfoques híbridos obliga a repensar nociones como las de reducción y autonomía, especialmente cuando estas se aplican en un contexto tan interdisciplinar.

La importancia de lo empírico

Como comentábamos, la segunda característica que hace especial la filosofía de la psicología es su relación con la filosofía de la mente, disciplina con la que a menudo se confunde. De hecho, si uno inspecciona los libros con el título de *Filosofía de la psicología*, encontrará que muchos lidian con el repertorio clásico de problemas de filosofía de la mente: la relación entre lo mental y lo físico, el conocimiento de lo mental o la conexión entre la mente y el mundo. Solo en los últimos veinte años puede uno descubrir manuales como los de George Botterill y Peter Carruthers, José Luis Bermúdez o Daniel Weiskopf y Fred Adams, que presentan la filosofía de la psicología con una agenda diferenciada.

Las diferencias entre la filosofía de la psicología y la filosofía de la mente radican principalmente en los intereses explicativos y en el grado de apego a los datos. El filósofo de la mente tiene detrás una larga tradición de cuestiones, típicamente metafísicas y epistemológicas, que indaga a través de intuiciones racionales a prio-

ri, es decir, independientes de los datos empíricos de la psicología. Esta tarea se escora hacia la filosofía de la psicología cuando el filósofo encuentra en dichos datos razones para enmendar el análisis de un determinado concepto.

Tenemos un ejemplo en el concepto de racionalidad: si uno concibe la racionalidad como un presupuesto normativo de interpretación que hace inteligible la conducta humana, su estudio parece inasequible a la indagación empírica. Ahora bien, al investigar los mecanismos en los que descansa la acción racional, la psicología pone de manifiesto que sufrimos una serie de sesgos y de errores sistemáticos. Ante ello, podríamos afirmar que la psicología ha descubierto que somos irracionales, o bien podríamos rechazar tales descripciones de hechos como irrelevantes para el análisis de la racionalidad. Pero, entre estos dos extremos, los filósofos prefieren examinar críticamente estos hechos para formular nociones alternativas; por botón de muestra, la de una racionalidad limitada, entre otros factores, por la capacidad cognitiva de los sujetos.

Finalmente nos encontramos con preguntas filosóficas que aparecen al hilo de la práctica misma de la psicología, y que a menudo son indistinguibles de las que un psicólogo se haría: por ejemplo, ¿qué es un concepto? ¿Cómo se adquiere y cuál es su función? En este sentido hay que entender la provocadora afirmación de Fodor en *El lenguaje del pensamiento* (1975) —posiblemente el libro de filosofía de la psicología más influyente del siglo XX—, cuando califica su obra como «un ensayo de psicología especulativa». En estos casos, el filósofo actúa más como un científico cognitivo que como un filósofo de la ciencia, y su pretensión es realizar aportaciones teóricas, antes que metateóricas; aunque no entra en su cometido proporcionar datos nuevos, sino que sus planteamientos son más bien abstractos y generales. La consecuencia de todo ello es que los filósofos de la psicología tienden hacia una especialización cada vez mayor, como se constata en los libros de referencia recientes, como el de John Symons y Paco Calvo. Así, podemos encontrar filósofos articulando específicamente una teoría de la conciencia, de la percepción, de la memoria o de cualquier otro dominio que la psicología investigue.

Una agenda actualizada

Dentro de toda esa variedad, los temas que más atraen la atención de la filosofía de la psicología son los que atañen a los fundamentos mismos de la cognición. Uno de ellos es el de la arquitectura cognitiva, concepto que hace referencia al tipo de estructuras y procesos sobre los que descansa la organización funcional de la mente. La noción de arquitectura proviene del mundo de la informática. De hecho, uno de sus principales debates se centra en saber cuál es el sistema computacional adecuado para dar cuenta de las capacidades inteligentes: ¿uno basado en símbolos manipulables por las reglas de un programa u otro de unidades simples densamente interconectadas que aprende de la experiencia?

Otro debate importante concierne a la cuestión de la modularidad, es decir, a la tesis de que las capacidades cognitivas se asientan sobre sistemas que acceden a parcelas limitadas de información (lingüística, visual, etcétera) y que operan de manera relativamente independiente entre sí. Relacionado con esta discusión se encuentra el problema del innatismo, es decir, de hasta qué punto la estructura y los procesos mentales fundamentales se encuentran preprogramados desde el nacimiento. Así, entre las preguntas que los filósofos intentan responder se cuentan: ¿cuál es la naturaleza de las reglas (si es que aceptamos que la inteligencia es un sistema basado en símbolos manipulables por las reglas)? ¿Qué propiedades debe tener un módulo psíquico (lingüístico, visual, etcétera)? ¿Qué criterios hay que seguir para determinar que algo es innato?

Seguramente el tema central es, por el modo en que afecta a todos los demás, el de la representación. Al preguntarse por el entramado de estados y procesos que dan soporte al mundo psicológico, durante mucho tiempo la noción de representación ha proporcionado la respuesta dominante. Los estados mentales se caracterizaban como representacionales, es decir, como dotados de un determinado contenido. De manera correspondiente, los procesos mentales debían entenderse como transiciones entre dichos estados gobernadas por principios sensibles a la estructura de las representaciones. El enfoque computacional de la mente se convirtió en el modo principal de entender tales estados y procesos. De manera que la tarea principal del filósofo consistía en comprender los fundamentos de la mente computacional y representacional.

No obstante, la novedad más destacable en la filosofía de la psicología actual es el creciente cuestionamiento del representacionalismo, especialmente por parte de los que entienden la mente de manera corporizada y situada. El cuerpo y el entorno, que el computacionalismo veía como meros proveedores de estímulos para la producción de representaciones, cobran un mayor peso a la hora de entender la naturaleza de las representaciones.

En esta línea, hay quien prefiere incluso abandonar, antes que transformar, la noción misma de representación, al considerarla un obstáculo para entender los factores que de veras constituyen la mente. Pero abandonar un constructo central tiene un precio, que uno solo debería pagar si cuenta con un concepto alternativo tan poderoso como aquel. Para hallarlo, algunos filósofos miran hacia propiedades del ámbito biológico, como la autoorganización; otros ponen el énfasis en la acción como prioritaria sobre la representación; otros redefinen la unidad de análisis en términos de un sistema acoplado agente-entorno.

Tengan éxito o no como alternativa global, lo cierto es que las tesis de la cognición corporizada y situada obligan al filósofo de la psicología a replantear sus preguntas sobre los temas que veíamos más arriba: ¿hasta qué punto el cuerpo y el entorno forman parte integral de la arquitectura cognitiva, si es que aún se puede mantener esta noción? ¿Se puede hablar de racionalidad corporizada? ¿Implican dichas tesis la falsedad del innatismo o simplemente obligan a reformularlo? El dinamismo de estos debates indica que el estudio de los fundamentos de la cognición no ha hecho más que empezar. MyC

PARA SABER MÁS

The philosophy of psychology. J. Botterill y P. Carruthers. Cambridge University Press, 1999.
Philosophy of psychology: A contemporary Introduction. J. L. Bermúdez. Routledge, 2005.
The Routledge Companion to Philosophy of Psychology. J. Symons y P. Calvo. Routledge, 2008.
El estado de la filosofía de la psicología. F. Martínez Manrique en *Teorema*, vol. 29, n.º 3, págs. 175-196, 2010.
An introduction to the philosophy of psychology. D. Weiskopf y F. Adams. Cambridge University Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cognición corporizada. Siri Carpenter en *MyC* n.º 73, 2015.

por Alejandra Fernández Trujillo



Alejandra Fernández Trujillo es médica adjunta de la Unidad de Medicina Intensiva del Hospital Universitario Parque Taulí. Máster en bioética, es miembro de la Comisión de Ética Asistencial del Parque Sanitario San Juan de Dios y del Hospital General de Cataluña.

Las decisiones médicas son cosa de dos

Una relación más empática con el paciente vuelve más eficaz la atención sanitaria

«Un bien moral impuesto ni es bien ni es moral», apuntaba Begoña Román, profesora de la Facultad de Filosofía de la Universidad de Barcelona en un artículo publicado en 1996 en *Ars Brevis*. Los tiempos en los que el médico sabía lo que convenía hacer y los pacientes asumían, obedientes, todas sus indicaciones han terminado. La sociedad ha cambiado, es más plural, más libre y está más informada. Cada persona quiere poder decidir cómo vivir, y este deseo no desaparece cuando se está enfermo. La relación médico-paciente debe adaptarse a la nueva realidad.

Venimos de un modelo paternalista en el que era el médico quien sabía y el paciente aceptaba sus indicaciones sin discusión. Pero la Ley 41/2002 de autonomía del paciente traspasó el protagonismo a la persona enferma y obligó a adoptar el modelo de decisiones compartidas. En este participan un experto en hechos (médico) y otro en valores (paciente). El primero posee solo el conocimiento científico sobre el mal que aqueja al segundo, quien sabe sobre su vida y tiene sus valores.

Sin embargo, aún no se ha dejado del todo atrás el paternalismo. Un trabajo realizado en 2016 por Nuria Padilla-Garrido, de la Universidad de Huelva, y sus colaboradores mostraba que, aunque más de un 78 por ciento de los pacientes oncológicos prefieren ejercer un papel más activo, perciben que no pueden participar en su proceso asistencial.

¿Hemos avanzado los médicos al ritmo al que lo ha hecho la sociedad? El desarrollo científico y tecnológico nos ha obligado a invertir mucho más tiempo en nuestra formación. Somos piezas de complejas redes asistenciales que trabajamos con protocolos y guías clínicas rigurosas. Sin embargo, el tiempo de atención a los pacientes se ha visto reducido, por lo que se ha dejado de lado el trato humano en aras de una mayor eficiencia. Tanto es así que, desde algunos sectores, surge la necesidad de humanizar de nuevo la medicina, de recuperar algo del buen hacer de antes sin que ello suponga continuar en el paternalismo. Algunos datos son desalentadores. Un estudio publicado en 2016 por Montse Esquerda, de la Universidad de Lérida, y sus colaboradores ha revelado que los estudiantes de medicina que tienen familiares médicos muestran menos capacidad de empatía. ¿De qué manera los futuros médicos respetarán la autonomía del otro si no pueden empatizar con él, conectar con su sufrimiento? Posiblemente este respeto se dará desde el desapego, en un modelo más clientelista, lejos de la persona que tienen delante.



Un modelo intermedio, más humano y equilibrado, es posible, aunque requiere un entrenamiento en habilidades comunicativas. Taimur Safder, de la Escuela de Medicina Baylor, en Dallas, en su artículo «The name of the dog» (2019), relata cómo durante la residencia aprendió de su adjunto a establecer una relación de confianza con sus pacientes interesándose por detalles concretos de su vida, como el nombre de su perro. Conocer el contexto en el que se desarrollaba la enfermedad facilitaba no solo el trabajo técnico, sino también un lazo con el paciente que era de gran ayuda aun cuando el curso de la enfermedad no fuera el deseado.

En la mayoría de las situaciones hay más de una opción buena, y es en estos casos cuando el modelo de decisiones compartidas adquiere mayor sentido. Pongamos un ejemplo: a un paciente con un traumatismo en la falange distal del dedo meñique se le puede tratar de forma conservadora y ver cómo evoluciona, o puede practicársele una pequeña amputación para evitar el riesgo de tener que extenderla más tarde a una parte más amplia del dedo. Se podría pensar que con cualquiera de estas intervenciones el impacto en la calidad de vida del paciente será casi nulo... a menos que el paciente sea concertista de piano, una circunstancia personal que deberá tenerse en cuenta en la decisión. Podrían mencionarse muchos más ejemplos, como saber si una paciente desea en el futuro tener hijos antes de practicársele una histerectomía, o conocer la fecha de una cirugía cardíaca en un paciente que quiere asistir a la boda de su hija. En todas estas cuestiones, el experto es el paciente. Hay que saber escuchar esa parte de la historia de la misma manera que se presta atención a los síntomas de la enfermedad. Así se generará una relación de confianza y se hará más fluido el proceso asistencial. Y las decisiones serán más acertadas.

Aún existen reticencias a aceptar el modelo de decisiones compartidas. Se argumenta que se trata de una moda pasajera, que el método resulta menos eficiente, que obliga a escoger opciones terapéuticas más caras, o que deja al paciente solo ante la decisión. Todo lo contrario. Incluso comienzan a proliferar las publicaciones médicas que indican que los pacientes prefieren tener un papel más activo. También demuestran la eficacia del modelo, que, al respetar la autonomía y la dignidad del enfermo, ayuda a generar competencia en la toma de decisiones. En definitiva, el modelo de decisiones compartidas ha venido para quedarse.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea y Gastro-Ventures.



El sofrito de tomate

De la despensa casera al supermercado

Un sofrito es un condimento que se añade a diversas elaboraciones para darles sabor. Se produce con diversos productos vegetales cortados y fritos en aceite a baja temperatura para evitar tuestes demasiado intensos. Se utiliza como base en la cocina española, italiana, portuguesa y latinoamericana.

La entrada del tomate en Europa hizo posible la incorporación de esta hortaliza a elaboraciones tradicionales. También al sofrito. El recetario del siglo XVII de Antonio Salsete incluye una referencia a la *Cazuela de tomates*: «Fríe cebolla en una cazuela y echarás los tomates. En estando casi fritos, échale una especia de cominos, ajos y pan molido, y sazónalo de sal, y agrio».

El sofrito de tomate se ha convertido en una elaboración tradicional en los países mediterráneos. Además de tomate, la receta base contiene cebolla, aceite de oliva y sal. El procedimiento se resume en poner en un recipiente aceite a calentar y añadir cebolla picada. Cuando la cebolla ya está dorada, se le adiciona el tomate cortado y una pizca de sal. La elaboración final debe presentar una textura espesa. Opcionalmente se puede incluir ajo, que se dora un momento antes de añadir el tomate, o pimiento, que se introduce poco después de la cebolla. También son habituales aromatizantes como el laurel, el tomillo u otros productos en función de las tradiciones locales.

A la hora de atreverse a elaborar un sofrito de tomate es importante conocer el comportamiento de la masa de tomate durante la cocción. Este fenómeno lo describe Claudi Mans en *Tortilla quemada. 23 raciones de química cotidiana* (Colegio Oficial de Químicos de Catalunya, 2005). Explica que el puré de tomate que se obtiene durante la elaboración del sofrito se comporta prácticamente como un sólido. Debido a su poca conductividad térmica, la masa inferior está muy caliente y la superior fría, pero su elevada viscosidad impide que se generen corrientes de convección. Ello provoca la aparición de burbujas de vapor de agua en la masa que está en contacto con el recipiente caliente, burbujas que se van desplazando hacia la parte superior, más fría. Cuando llegan a la superficie, estas burbujas de vapor de agua envueltas con tomate caliente explotan. Hay dos formas de evitarlo: remover constantemente para forzar la convección o cocer a fuego lento para que la evaporación del agua no sea tan rápida.



LAS BURBUJAS se forman por la escasa conductividad térmica y elevada viscosidad de la masa de tomate.

CORTESÍA DE CLAUDI MANS

La proliferación de huertos con tomateras en los países del sur de Europa ha propiciado la necesidad de conservar este producto para su utilización durante todo el año. Una forma práctica de conservación de tomates es hacer el sofrito correspondiente e introducirlo en recipientes de vidrio cerrados herméticamente y pasteurizados (esto es, calentados en un baño de agua a ebullición durante media hora). Una tradición que se va realizando año tras año durante el verano mediterráneo.

El éxito de estas conservas caseras se transmitió a la industria alimentaria, que ha inundado los supermercados. Inicialmente se vendían tomates triturados en latas o en envases de vidrio, pero la comodidad de tener ya preparado el sofrito ha hecho que la mayoría de ventas de derivados del tomate correspondan a esta elaboración. Las versiones que se pueden encontrar son varias: tomate frito básico, *gourmet*, ecológico, especial para pizza, «de temporada» o el etiquetado como «receta casera». Y también variaciones con aplicaciones concretas: boloñesa, parmesana, *arrabbiata*, con albahaca, con *ricotta*, napolitana, con verduras al grill y muchas otras combinaciones.

Se han publicado numerosos artículos científicos sobre el tomate. Específicamente referido al sofrito destacamos el trabajo «*Bioactive compounds present in the Mediterranean* sofrito», publicado por Anna Vallverdú Queralt y otros colaboradores del Departamento de Nutrición, Ciencias de la Alimentación y Gastronomía de la Universidad de Barcelona en *Food Chemistry* en diciembre de 2013. La conclusión es clara: el sofrito de tomate constituye un componente clave de la dieta mediterránea, una dieta fuertemente asociada a un menor riesgo de enfermedades cardiovasculares. Los análisis han revelado que, además de una concentración elevada de licopeno (un antioxidante abundante en el tomate), el sofrito elaborado con cebolla y cocinado durante 60 minutos presenta también unos niveles superiores de otros nueve antioxidantes.

El tomate y su elaboración en sofrito constituye un producto de ida y vuelta en numerosos países iberoamericanos, que lo han introducido con variaciones adaptadas a sus tradiciones. Un ejemplo es el picadillo habanero: sofrito de tomate básico con carne picada y patatas, servido con una base de arroz blanco.

Dado que el consumo de sofrito de tomate va en aumento, el sector alimentario está desarrollando nuevas propuestas. Las investigaciones se centran en productos con altos índices de antioxidantes y adaptados a todos los gustos.

LA INFLUENCIA DE

Los estrechos lazos que los papiones entablan parecen ser de ayuda para vencer las adversidades de la infancia. Ello podría tener notables implicaciones en la salud humana

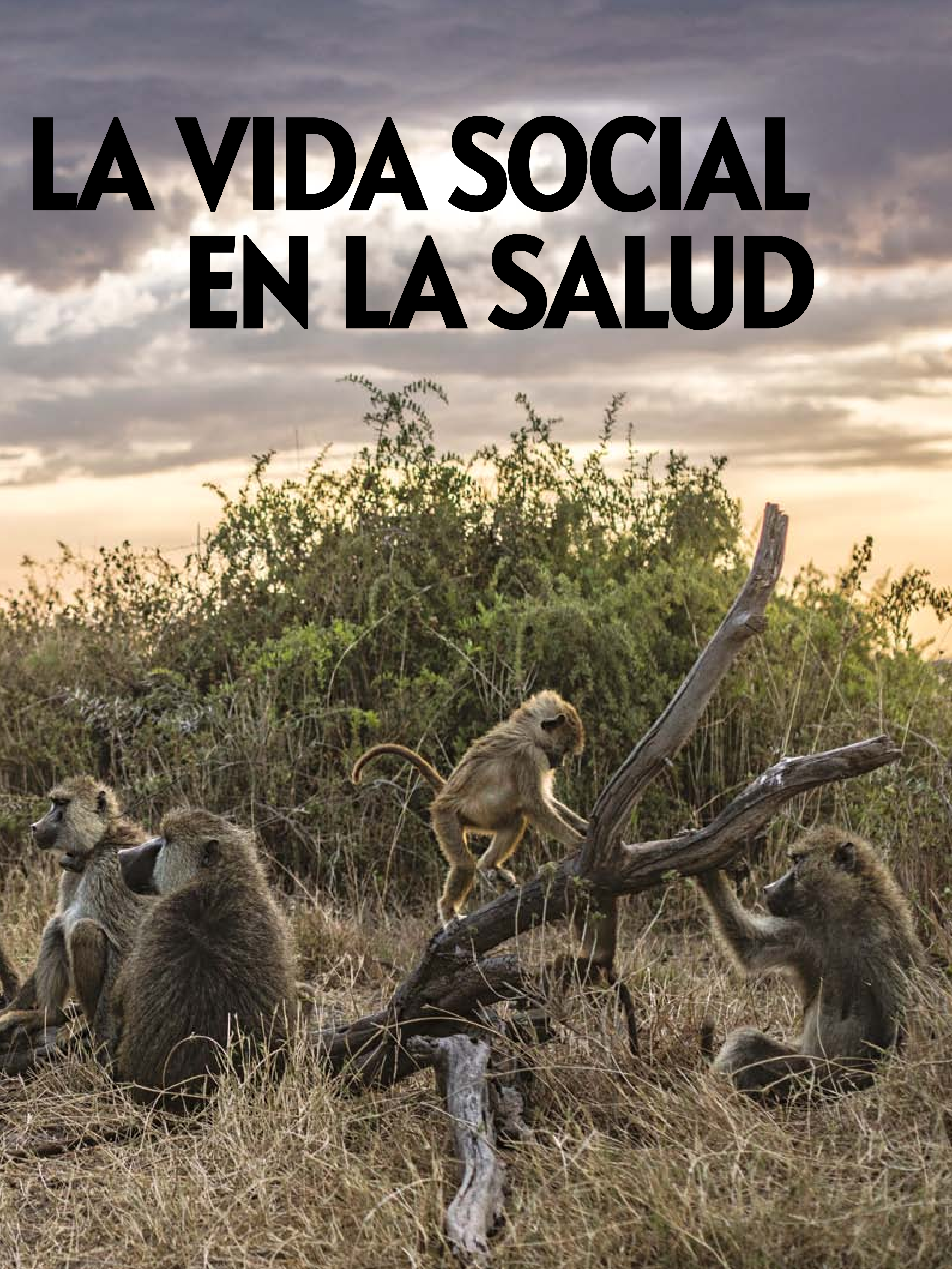
Lydia Denworth

Fotografías de Nichole Sobecki



UNA MANADA DE PAPIONES AMARILLOS se congrega al atardecer en el Parque Nacional de Amboseli, en Kenia. Con su estudio se pretende averiguar de qué modo influyen las costumbres sociales en la salud.

LA VIDA SOCIAL EN LA SALUD



Lydia Denworth es periodista científica. Ha escrito artículos y libros sobre temas diversos, en especial sobre neurociencia y comportamiento social.





Despunta el día en el Parque Nacional de Amboseli, en el sur de Kenia. Encaramados a un bosquete de acacias que domina la llanura, un grupo de unos 70 papiones amarillos inicia plácidamente la jornada. Algunos dormilones yacen aún en lo alto de las copas, pero la mayoría ha descendido a la hierba, uno a uno.

Hiawatha, una hembra de seis años, hurga en el pelaje de su hermana mayor, Hoja, en busca de suciedad y parásitos. «Es como nuestro ritual diario de levantarse, darse una ducha, lavarse los dientes y peinarse», comparte en voz baja Kinyua Warutere, veterano ayudante de campo del Proyecto de Investigación de los Papiones de Amboseli. «Antes de ponerse en marcha, socializan de ese modo. Las madres acicalan a los pequeños y los amigos se acicalan unos a otros.»

Algunas crías andan ya jugando. La más pequeña, Huawey, no ha cumplido los dos meses y es un monito vacilante. Aún luce el pelaje negro y los rasgos faciales de vivo rosa distintivos de su tierna edad, pero su pelo no tardará en adquirir tonalidades doradas y, después, pardogrisáceas. Se revuelca con un compañero de juegos mientras se propinan coscorrones en la cabeza, como gatitos. Cada par de minutos, eso sí, vuelve en compañía de su madre, Hiawatha, para arroparse un momento bajo su brazo antes de aventurarse solo de nuevo.

El porvenir de Huawey y de sus compañeros de juego interesa vivamente a Susan Alberts, que permanece de pie mientras los observa con sus prismáticos desde un todoterreno salpicado de barro. Esta bióloga evolutiva de la Universidad Duke y codirectora del proyecto, ha dedicado 34 años de su carrera al estudio de este clan de papiones. Desde 1971, año en que naciera de la mano de los primatólogos Jeanne y Stuart Altmann, el proyecto de Amboseli ha tenido como propósito ahondar en las raíces evolutivas del comportamiento social de estos primates. El último trabajo del equipo ha versado sobre las consecuencias a largo plazo de lo que sucede durante la gestación y la infancia.

Las perspectivas no son halagüeñas para Huawey y sus compañeros. Han de superar lo que Alberts llama «la criba darwiniana». Entre el 30 y el 50 por ciento de las crías muere antes de cumplir el primer año, en general por la escasez de alimento, las enfermedades y los depredadores. Pero algunas tienen menos posibilidades que otras —si nacen en plena sequía, por ejemplo, o si quedan huérfanas—. En el primer estudio longitudinal y prospectivo de su tipo, publicado en 2016, los investigadores de Amboseli destacaron que una infancia aciaga cercena drásticamente la esperanza de vida, casi hasta la mitad.

Desde entonces, este equipo ha descubierto una posible fuente de protección frente a las adversidades sufridas en la edad temprana: los lazos sólidos y duraderos trabados con otros papiones. Ahora intentan determinar hasta qué punto ha de re-

EN SÍNTESIS

Desde hace casi 50 años, el Proyecto de Investigación de los Papiones de Amboseli ha estudiado el comportamiento de estos primates en libertad con rigurosos instrumentos de observación. Los datos indican que aquellos que sufren penurias durante la infancia tienden a morir antes que los demás.

Con todo, nuevos indicios apuntan a que los papiones pueden superar esas vicisitudes si traban relaciones sólidas con otros miembros del clan. Los investigadores de Amboseli defienden que los vínculos sociales estables influyen en la salud física.

Esas nuevas ideas aportadas por la ciencia evolutiva pueden cambiar nuestra visión de la salud pública. Quien ha vivido una infancia difícil es más proclive a padecer enfermedades: ¿podrían los lazos sólidos rescatar a la gente de unos inicios aciagos?



1



2



3

EL INVESTIGADOR Longida Siodi esgrime en alto una antena para localizar a los papiones, algunos de los cuales llevan collares radioemisores (*1*). Los miembros de uno de los grupos investigados, denominado Yoda, se localizan en la planicie (*2*). El jefe de proyecto Raphael Mututua busca a los papiones que estudiará esa jornada (*3*).

currir un individuo a esas relaciones para enderezar su destino. No solo se trata de una cuestión primordial para estos primates, sino para las personas que comienzan con mal pie la vida.

Salta a la vista que nos separan diferencias notables, pero los paralelismos en los elementos básicos que condicionan la vida resultan sorprendentes: desde el entorno fetal y neonatal hasta las relaciones sociales en la edad adulta y las pautas de mortalidad. Es más, el estudio de la influencia del desarrollo infantil en la salud humana ha permitido saber que el nacer con poco peso y recibir una nutrición insuficiente de la madre exacerba el riesgo de problemas de salud en el futuro. Y los estudios retrospectivos indican que los traumas psicológicos sufridos durante la infancia, como los abusos o la muerte de un progenitor, también acarrean una mayor probabilidad de problemas psicológicos y médicos en la edad adulta.

Con menos variables de confusión y una vida más corta (pero no demasiado), los papiones brindan una interesante oportunidad para enlazar la investigación sobre la evolución y la salud humana, y para conocer mejor los orígenes de la enfermedad y cómo protegernos de ella. En palabras de Elizabeth Archie, directora adjunta de este proyecto científico y etoecóloga en la Universidad de Notre Dame: «El hecho de que observemos una relación entre el apoyo social y la longevidad en el mundo animal, donde no hay hospitales ni nadie que te lleve a uno, significa que ha de haber un factor esencialmente biológico en juego». Dicho de otro modo, el bienestar no guarda relación exclusiva con el acceso a la atención sanitaria. Y desentrañar las razones podría tener amplias implicaciones para la salud pública.

ECHAR RAÍCES EN AMBOSELI

Cuando los Altmann desembarcaron en África en 1963, pocos primatólogos trabajaban sobre el terreno. Pasaron meses recorriendo Kenia y Tanzania antes de elegir Amboseli como lugar de estudio. Con una extensión de 39.000 hectáreas, el arbolado disperso de acacias y las amplias praderas ofrecían una buena visibilidad y miles de papiones que observar, amén de elefantes, cebras y jirafas. Una vez instalados en el campamento permanente en 1971, Jeanne Altmann, matemática de formación que acabó asumiendo la responsabilidad del proyecto, comenzó a cavilar seriamente en cómo registrar las observaciones con rigor. Concibió una técnica metódica en que cada observador debía seguir a un animal en un orden concreto durante un período prefijado, anotando atentamente cuanto hiciera y con quién. Su artículo acerca de los métodos de muestreo, publicado en 1974, hizo posible validar la medición del comportamiento en el medio natural; se convirtió en una de las biblias de la primatología.

Altmann también hizo dos cosas harto inusuales en aquel entonces. La primera, prestar atención a las hembras en un momento en que el interés se centraba en la agresividad masculina y la suposición de que la competencia violenta decidía el destino del animal. «Predominaba la idea, en unas ocasiones de





NOTAS DE CAMPO sobre las interacciones sociales mantenidas por los miembros del grupo de Acacia (*1*). Heces de un papión del grupo de Yoda; con ellas se analizarán los niveles de hormonas y se determinará a qué linaje de la manada pertenece (*2*).

forma explícita y en otras implícita, de que los machos lo eran todo en la evolución de la especie», me explicaba el verano de 2017 en su despacho de la Universidad de Princeton, donde es catedrática emérita de ecología y biología evolutiva. Pero la sociedad de los papiones está organizada en linajes maternos. Las hembras suelen permanecer en el mismo grupo toda la vida, mientras que los machos lo abandonan cuando alcanzan la madurez sexual. «Percibía que las hembras, sobre todo de los mamíferos y más aún de los primates (incluida la especie humana), no solo tenían el control de su propia vida —en la medida en que cualquiera lo tiene—, sino también el de la generación siguiente. ¿Por qué debería ser ello irrelevante para la evolución?» Altmann era consciente de que el asunto iba para largo, pues habría que recabar datos de los mismos grupos de papiones durante generaciones.

El equipo científico que hoy trabaja en Amboseli representa su propio linaje materno, en un sentido académico. Altmann sigue siendo una de las directoras. Alberts llegó al parque un año después de graduarse en 1984 y fue una de sus primeras doctorandas antes de convertirse a su vez en directora. Las dos directoras adjuntas, Archie y Jenny Tung, biólogas evolutivas de Duke, estudiaron con Alberts al acabar el grado. Entre todas, abarcan todos los aspectos, desde la demografía de los seis grupos hasta el microbioma y la genética de los individuos. De los tres ayudantes de campo más veteranos, Warutere es el más joven, con «solo» 23 años de experiencia. El gestor del proyecto, Raphael Mututua, y su segundo, Serah Sayialel, comenzaron a trabajar allí en los años 80. Hasta los conductores de los vehículos y uno de los cocineros son viejos veteranos.

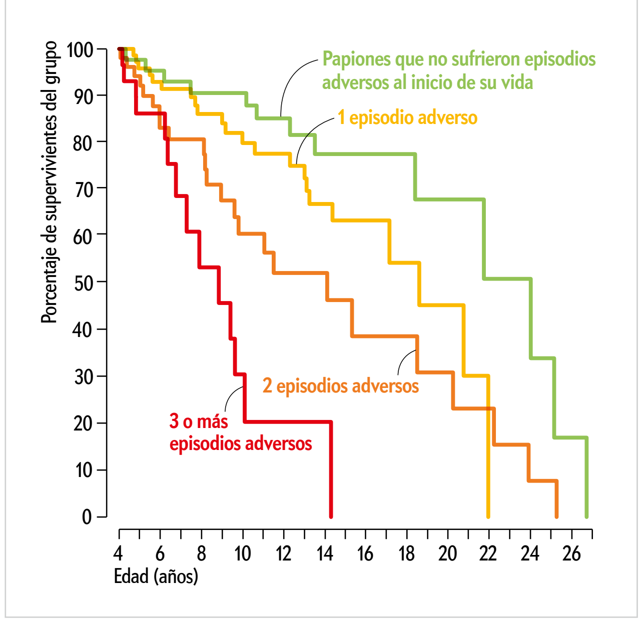
Las ventajas de esa larga implicación en el proyecto resultan evidentes en el campo. Warutere, al igual que Mututua y Sayialel, reconoce a primera vista a cada animal, ya esté en movimiento o en las ramas de los árboles. Mientras contemplamos el nuevo día que inicia la manada, toma notas de campo en una libreta amarilla sobre los nacimientos, decesos, heridas visibles y el estado reproductor, que las hembras anuncian con la hinchazón y el color de las nalgas. Cuando acaba el censo, comienza a recoger datos tal y como Altmann concibió hace décadas: observa a cada papión durante 10 minutos y anota lo que está haciendo, como comer, descansar o acicalarse, y con quién lo hace. Warutere y sus colegas se aseguran de que cada individuo sea observado durante el mismo tiempo en total.

Si se multiplican esos datos matinales por dos sesiones diarias, seis días a la semana, 52 semanas al año y 48 años, el resultado es una base de datos casi sin parangón en ninguna otra especie o población de fauna. Comprende cerca de 1800 animales, pertenecientes a seis generaciones y media. Las anotaciones contienen también aspectos íntimos. Las libretas de campo vuelven a relatar los pormenores de miles de encuentros, como los que acabamos de presenciar entre Hoja, Hiawatha y Huawey.

HALLAZGOS

La infancia adversa afecta a la supervivencia

El análisis de la vida y la muerte de 196 hembras de papión de Amboseli reveló que las causas de la adversidad infantil son acumulativas, lo cual tiene implicaciones para la longevidad. Las hembras que soportaron tres o más episodios desfavorables cuando eran crías, como sobrevivir a una sequía, tener hermanos de edad similar o sufrir la muerte de la madre, murieron en promedio 10 años antes que las que gozaron de una crianza más favorable.



FUENTE: «CUMULATIVE EARLY LIFE ADVERSITY PREDICTS LONGEVITY IN WILD BABOONS», JENNY TUNG ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 7, ART. N.º 11181, 19 DE ABRIL DE 2016; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)





SOBRE EL TERRENO: Mututua y Siodi observan el grupo de papiones de Acacia un atardecer de inicios de noviembre (*1*). Uno de ellos está comiendo en un árbol (*2*).

LA TRASCENDENCIA DE LOS INICIOS

Al cabo de más de cuatro décadas de acumular pormenores sobre la vida de los papiones, los científicos de Amboseli comenzaron a preguntarse si su investigación sería relevante en un campo incipiente de la epidemiología: la influencia del desarrollo en la salud. Las teorías acerca de la repercusión que el ambiente fetal y neonatal tiene sobre las enfermedades en la edad adulta han ido ganando relevancia desde los años 80, pero no se habían estudiado en la práctica. Y en la especie humana, resulta difícil desentrañar los efectos de la adversidad en la edad temprana de las diferencias en cuanto a los hábitos saludables y el acceso a la atención sanitaria.

La idea de que esas fases del desarrollo pueden ser importantes surgió en 1986, cuando el epidemiólogo David Barker publicó el primero de una serie de artículos donde señalaba un nexo entre la desnutrición del feto y dolencias y trastornos como la diabetes, el infarto de miocardio o la hipertensión. Entre otras cosas, descubrió que la incidencia de la diabetes de tipo 2 en un colectivo de sexagenarios británicos estaba vinculada con el bajo peso al nacer. Barker y sus colaboradores concibieron la idea de que la desnutrición fetal podría condicionar el riesgo de sufrir, décadas después, enfermedades crónicas que solemos relacionar con el sobrepeso del adulto, explica el antropólogo Chris Kuzawa, de la Universidad Noroccidental. Otros desgraciados experimentos espontáneos apuntan en una dirección similar. A finales de la Segunda Guerra Mundial, los habitantes de una región de los Países Bajos ocupada por Alemania sufrieron una hambruna durante el invierno de 1944 a 1945, a raíz de una huelga de ferroviarios que interrumpió el abastecimiento de alimentos. El dilatado estudio sobre el «Invierno del Hambre» ha revelado en los adultos nacidos entonces efectos perjudiciales de carácter cardiovascular, metabólico y cognitivo.

A la luz de tales hallazgos, en 1992 Barker y C. Nicholas Hales, bioquímico de la Universidad de Cambridge, plantearon la hipótesis del fenotipo ahorrador, la cual postula que las penurias padecidas desde la gestación ponen en riesgo ciertos aspectos del desarrollo al primarse la supervivencia (por ejemplo, la desnutrición fetal alteraría el metabolismo de la glucosa). Una década más tarde describieron que, en algunas especies, sobre todo de insectos, es posible pronosticar el devenir de los adultos según las condiciones que experimentan al inicio de la vida. Refinaron la hipótesis y la renombraron «respuesta adaptativa anticipatoria», afirmando que la adaptación a las condiciones adversas en el vientre materno y los primeros años prepara

mejor al individuo ante condiciones similares en momentos ulteriores de la vida. La teoría subraya que la discordancia, como la desnutrición fetal o infantil seguida de abundancia de alimento, sería una receta para la enfermedad. La idea caló con rapidez entre los expertos en salud pública.

La variación en las respuestas adaptativas depende de la idea de plasticidad del desarrollo, es decir, la capacidad del organismo para hallar más de un modo de afrontar las condiciones ambientales y adaptarse a ellas. Las mejores demostraciones del principio las ofrecen los animales de vida breve, como una especie de topillo siberiano. A partir de las señales producidas por la melatonina materna que reciben en el útero, las crías de este roedor que nacen a inicios del verano maduran y procrean con rapidez, mientras que las nacidas cuando los días se acortan crecen con más lentitud y no se multiplican hasta que no vuelve a lucir el sol.

Otros investigadores se toparon por casualidad con las secuelas del estrés psicológico y social sufrido al inicio de la vida. En los años 80, Vincent J. Felitti regentaba una clínica de adelgazamiento en California. La obesidad de una de sus pacientes parecía estar ligada a los abusos sexuales que sufrió de niña. Ello impulsó a este médico a investigar los vínculos entre las disfunciones familiares en la infancia y las enfermedades y las conductas de riesgo en la edad adulta.

Felitti aunó esfuerzos con Robert Anda, entonces en los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU., y junto con otros colegas emprendieron en 1995 el estudio Experiencias Adversas en la Infancia (ACE, por sus siglas en inglés). Definieron siete categorías de experiencias infantiles, como ser víctima de abusos o de violencia doméstica, o tener familiares reclusos o que se hubieran suicidado. En los más de 9500 adultos que respondieron al cuestionario, se constató una estrecha relación entre el número de categorías en las que encajaban y la probabilidad del encuestado de caer en la toxicomanía, cometer un intento de suicidio u otras conductas de riesgo. La pertenencia a cuatro o más categorías multiplicaba entre 4 y 12 veces el riesgo. El estudio detectó asimismo un mayor riesgo de cardiopatías y cáncer, entre otras enfermedades.

En los papiones de Amboseli, Alberts, Tung y sus colaboradores vieron la oportunidad de someter a prueba esas ideas. En 2015, el equipo evaluó la hipótesis de la respuesta adaptativa anticipatoria con los datos que había recabado en 2009, un año de sequía atroz que causó la muerte del 98 por ciento de los ñus de Amboseli. Los investigadores se fijaron en las adultas nacidas en años precedentes, que habían sido o secos o lluviosos. Puesto que el éxito reproductor es el parámetro más importante en biología evolutiva, compararon la fecundidad de esos individuos en 2009 con la de otros años. Como era previsible, todas tendieron a procrear menos durante la sequía pertinaz. Pero, en contradicción directa con el modelo de respuesta adaptativa anticipatoria —que planteaba que el haber nacido en un año seco prepararía a la hembra para la sequía, lo cual mitigaría el efecto de esta sobre su fecundidad—, a las nacidas en años de precipitación escasa no les fue mejor que a las del grupo de lluvias abundantes. Al contrario, les fue peor. Alberts y sus colaboradores proponen que interviene un fenómeno casi opuesto a la respuesta adaptativa anticipatoria: un modelo de limitaciones del desarrollo. Este predice que «nacer en un ambiente desfavorable supone una desventaja en *todos* los ambientes», asegura Alberts.

El equipo concibió asimismo una versión del estudio ACE en papiones. Este primate no sigue un celo estacional, por lo que no hay dos individuos que compartan la misma experiencia. «Todos nacen en un momento distinto, así que numerosos aspectos del entorno intrauterino y neonatal son sumamente específicos de cada individuo», explica Alberts. Publicado en 2016 en *Nature Communications*, el estudio analizó la historia vital de 196 hembras y consideró seis categorías de adversidad durante los primeros cuatro años de vida: sequía; tamaño del grupo (influye en la competencia y la fecundidad); escalafón social y nivel de integración de la madre; tener hermanos menores de 18 meses; y muerte de la madre.



1



2

Los resultados no dejaron sombra de duda. Las afectadas por tres o más tipos de adversidad murieron en promedio 10 años antes que las afectadas por uno o ninguno (la esperanza de vida media del grupo era de 18,5 años). Y aquellas que sufrieron la mayor adversidad fueron también las más aisladas socialmente durante la edad adulta. Según Alberts, «es un efecto asombroso. Explica el 12 por ciento de la variación en la esperanza de vida, que es muchísimo para ser un componente de la aptitud biológica».

A Kuzawa, que supervisa un estudio a largo plazo sobre la repercusión del desarrollo temprano en la salud humana en las Filipinas, le gustó ver como en Amboseli se sometía a prueba el modelo de respuesta adaptativa anticipatoria, algo que hasta entonces apenas se había hecho. Este especialista argumenta que las condiciones imperantes al inicio de la vida tal vez permitan pronosticar las vicisitudes del adulto en un animal de vida breve como el topillo, en el que es más probable que los factores


EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN de los Papiones de Amboseli está estudiando individuos del grupo de Acacia (*1* y *3*) y de Yoda (*2*), entre otros. Los papiones brindan la oportunidad de enlazar la cuestión con el estudio de la evolución y la salud humana.

3

ambientales presentes al nacer sigan vigentes cuando le llegue el turno de engendrar su descendencia. Pero el modelo no sería forzosamente válido en la especie humana, que vive hasta los 70 años o más. «Uno ve que se repiten las mismas ideas pero no hay ninguna prueba de peso sobre ello», explica. Los papiones, que viven hasta 30 años, son más equiparables a los humanos. Es por eso por lo que Kuzawa califica el proyecto de Amboseli como «un recurso único para observar esos efectos a largo plazo».

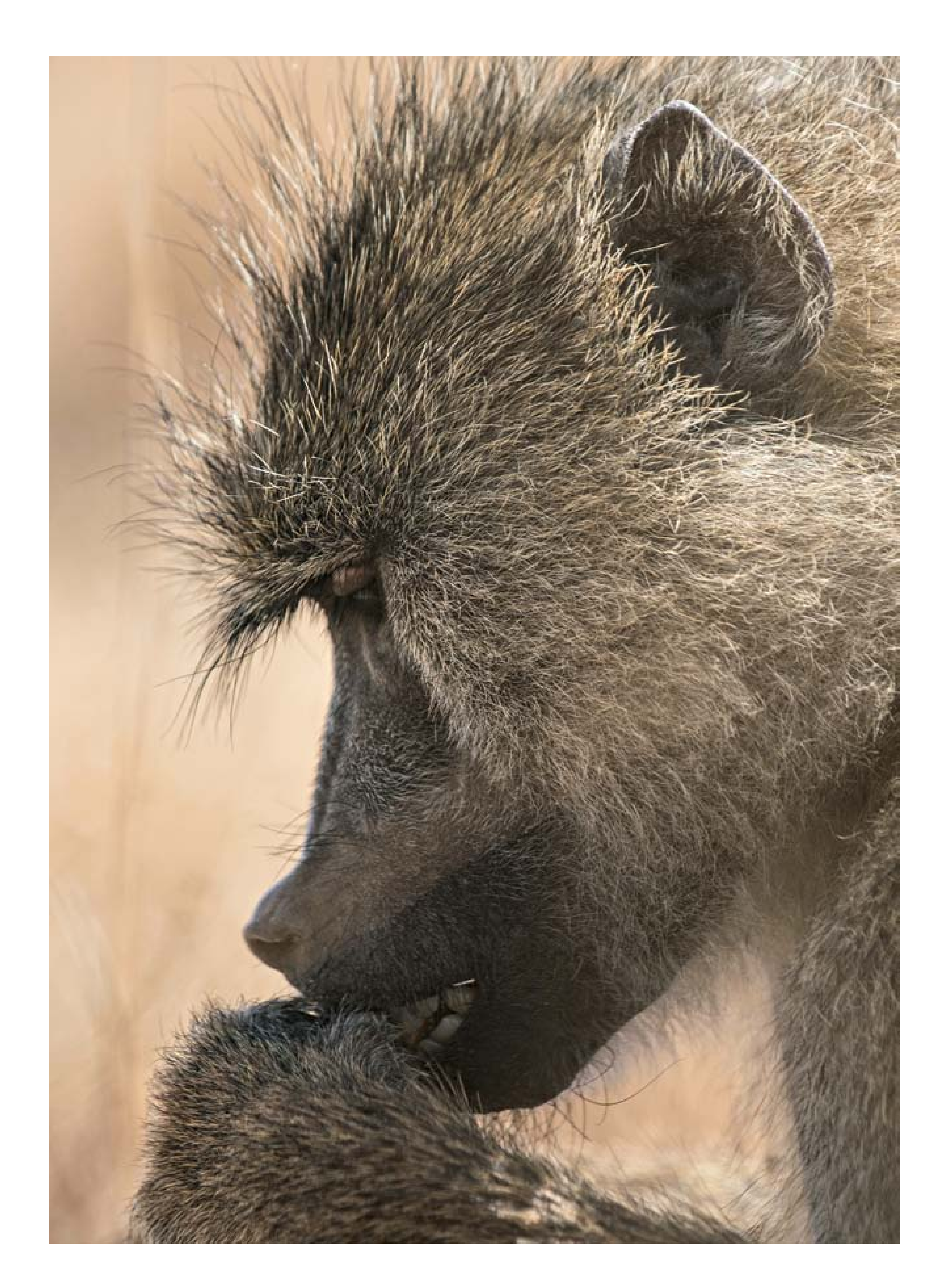
RESILIENCIA GRACIAS A LAS RELACIONES

En el caso de las personas que sufren una infancia aciaga, la gran pregunta es: ¿hasta qué punto pueden las circunstancias futuras compensar el efecto de esos inicios azarosos? Los últimos estudios de Amboseli ofrecen pistas. No todas las crías infortunadas acaban tristemente sus días. La diversidad observada en su longevidad lleva a suponer que algunas son capaces de cambiar su suerte. Los investigadores del parque han hallado indicios de que los vínculos fuertes les ayudan a contrarrestar los efectos nocivos de esa adversidad. Nacer en plena sequía, por ejemplo, queda mitigado por tener una madre de alto rango. Las relaciones de acicalamiento que mantienen las hembras con los machos, a diferencia de las mantenidas con otras hembras, no resultan tan afectadas por la adversidad temprana, lo cual apunta a un posible efecto amortiguador. La experiencia de la madre en su infancia repercute en las generaciones venideras de papiones. «Si la madre de uno fallece pero no tiene una niñez desgraciada, su supervivencia estará en riesgo, pero no será mucho peor que la de los niños cuya madre sigue viva. Pero si la madre muere y tiene una infancia dura, estará perdido», explica Alberts.

Estos hallazgos concuerdan con los trabajos pioneros de Amboseli sobre la relevancia funcional de los lazos sociales. A mediados de los 90 el proyecto ya contó con datos completos (nacimiento, procreación y muerte) de un centenar de hembras y comenzaba a cosechar los frutos de la perspicacia de Jeanne Altmann. Ella y Alberts formaron un equipo con el antropólogo evolutivo Joan Silk, ahora en la Universidad Estatal de Arizona, con el fin de investigar hasta qué punto las relaciones sociales de un animal contribuían a su éxito reproductor.

Silk pasó un año en Amboseli como investigador posdoctoral. A caballo del cambio de siglo, cuando algunos primatólogos comenzaron a decir que los animales cultivan la amistad, se preguntó si estaban en lo cierto y si eso importaba. Siempre se ha dicho que la variable esencial en las sociedades jerarquizadas de los monos es el rango jerárquico. Pero a Silk le intrigaban los indicios crecientes de que las relaciones sociales están vinculadas con la salud en el ser humano. Un artículo fundamental de 1988, publicado en *Science* por el sociólogo James House y sus colaboradores de la Universidad de Michigan, concluyó que el aislamiento social podía ser tan mortífero como la obesidad y el tabaco.

Así que Silk, Alberts y Altmann dirigieron su atención a la base de datos de Amboseli. El segundo ya había creado lo que se denomina índice de sociabilidad, un parámetro que



recoge la fortaleza de los lazos sociales en función de la cercanía, el acicalamiento y otras conductas sociales (básicamente, la frecuencia con la que las hembras mantienen encuentros amistosos). Al confrontar ese índice con el número de crías supervivientes descubrieron, para su sorpresa, que la integración social predecía el éxito reproductor en mayor medida que el rango jerárquico o cualquier otra variable estudiada. Ese resultado, que Silk califica como «impactante», vio la luz en 2003 en *Science*.

A fin de corroborar que el hallazgo no era exclusivo de Amboseli, Silk emprendió un análisis similar junto con Robert Seyfarth y Dorothy Cheney, biólogos evolutivos en la Universidad de Pensilvania, con los datos de sus investigaciones sobre los papiones en la Reserva de Caza de Moremi, en Botsuana. «Los resultados de ambos estudios sorprendían por sus coincidencias», explica Seyfarth. En 2014, otros trabajos llevados a cabo en Amboseli y Moremi revelaron que el nivel de relación social no estaba relacionado solo con la reproducción, sino también con la longevidad.

No obstante, los aspectos negativos de un mal comienzo todavía tienden a superar los efectos positivos de la conexión social en los papiones. Ahora bien, puesto que las relaciones sociales ejercen cierto efecto protector y alargan la vida, el equipo de Amboseli se pregunta ahora, como Archie plantea: «¿Puede actuar la amistad como un salvavidas?». Si la respuesta es afirmativa, quizá las razones estriben en la biología. «¿Qué ocurre a escala molecular y fisiológica?», se pregunta Tung, a quien ante todo le interesa la interrelación entre los genes y el comportamiento. «¿Cómo actúa [el comportamiento social] bajo la piel e influye en el funcionamiento del genoma?»

El descubrimiento más intrigante de Tung hasta la fecha, publicado en 2016 en *Science*, no procede de los papiones, sino de un grupo cautivo de macacos de la India. Su laboratorio de Duke manipuló su estado social creando primero grupos de hembras que después reorganizó. Cuando estudiaron las células de varios individuos para ver cómo se comportaban ante las infecciones, hallaron claras diferencias en la regulación de los genes inmunitarios que dependían de la condición social. «Creemos que la integración y el aislamiento social probablemente sí ejercen un efecto directo en el sistema inmunitario», afirma.

Aunque Tung no puede manipular los grupos de papiones en libertad, ahora analiza muestras de heces, recogidas en vasos de papel, en busca de pautas similares. Dirigido por Archie, el equipo está secuenciando el microbioma de unas 20.000 muestras. Hasta ahora han descubierto que el microbioma de los papiones es un reflejo de la estructura social: los integrantes de cada grupo presentan una microbiota intestinal similar. Además, los miembros que se acicalan mutualmente con asiduidad presentan más similitudes entre sí que con los demás. Una vez que concluya la secuenciación, buscarán aspectos del microbioma que predigan la salud, la supervivencia o el éxito reproductor.

Las nuevas ideas sobre la plasticidad del desarrollo surgidas del Proyecto de Investigación de los Papiones de Amboseli están agitando el debate al tiempo que despiertan el entusiasmo. La publicación en 2017 de una revisión en *Evolution, Medicine, and Public Health* generó cinco comentarios a modo de réplica, uno de ellos de Kuzawa, que criticaban la definición de «inicio de la vida», que los revisores situaban desde la concepción hasta la madurez sexual. Otros adujeron que no habían prestado suficiente atención al papel de los progenitores como mediadores de las condiciones iniciales. Y, por último, unos pocos manifestaron su escepticismo de que los modelos animales sirvieran para reflexionar sobre las enfermedades humanas.

En lo que casi todos coinciden es en que la aplicación de la ciencia evolutiva a la salud pública puede aportar pistas importantes sobre las causas de las enfermedades y ayudar a concebir tratamientos mejores. Una revisión de 2017 en *Lancet* señalaba: «No es exagerado afirmar que [el estudio evolutivo] podría revolucionar la disciplina». Los autores explican que mejorará nuestra comprensión de por qué la pobreza y las privaciones tienen una repercusión tan profunda en la salud y la esperanza de vida, y subrayan que ciertos factores, como los hábitos nocivos para la salud, no lo explican todo. A fin de cuentas, afirma Alberts, «los papiones no tienen hábitos de salud».

Al término de nuestra mañana en la sabana, nos encaramamos a una ladera rocosa que dominaba el hogar de los papiones, con rebaños de cebras y ñus pastando en la lontananza. Allí Alberts me resumió el trabajo del proyecto con un esquema en mi cuaderno de notas. Dibujó tres recuadros en fila: en el primero escribió «AI» por adversidad inicial, en el segundo «CS» por conectividad social en la edad adulta, y en el tercero «S + S», salud y supervivencia. Añadió unas flechas entre los recuadros, todas apuntando a la derecha, para mostrar la influencia de la adversidad sobre la conectividad y de esta con la supervivencia. A raíz de la nueva investigación, dibujó una tercera flecha, que sobrevolaba los recuadros desde la adversidad inicial hasta incidir directamente en el binomio de salud y supervivencia, obviando la conectividad. Esto representa el grado en que la adversidad contrarresta el efecto positivo de las relaciones estables.

Las flechas son importantísimas. Lógicamente, la adversidad en la infancia ha de preceder a la supervivencia. Pero ¿dónde encaja la conectividad social? ¿Cuánto contribuye a la salud de cada cual? No se puede descartar que los individuos más sanos tengan más posibilidades de conectar antes que los demás.

Me devuelve el cuaderno y me dice: «Creo que todas esas flechas son reales». Quiere decir que cada elemento ejerce su influencia de la forma que ha dispuesto. Si está en lo cierto, la conectividad social tiene la facultad de alterar el curso vital de quien ha tenido una infancia adversa. Y aunque no fuera así, Alberts está convencida de que los papiones tienen más que decirnos sobre la especie humana. «Cuando un fenómeno que tanto nos preocupa en nosotros mismos demuestra tener raíces evolutivas, esto tiene enormes consecuencias en nuestros planteamientos sobre cómo solucionar los problemas que derivan de él», concluye. IyC

PARA SABER MÁS

Baboon metaphysics: The evolution of a social mind. Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth. University of Chicago Press, 2007.
Cumulative early life adversity predicts longevity in wild baboons. Jenny Tung et al. en *Nature Communications*, vol. 7, artículo n.° 11181, 19 de abril de 2016.
The challenge of survival for wild infant baboons. Susan Alberts en *American Scientist*, vol. 104, n.° 6, págs. 366-373, noviembre-diciembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Pobreza y enfermedad. Robert M. Sapolsky en *IyC*, febrero de 2006.
Origen fetal de las enfermedades. Josep C. Jiménez Chillarón en *IyC*, octubre de 2013.
Desigualdad económica y salud pública Robert M. Sapolsky en *IyC*, enero de 2019.

MATEMÁTICAS

GEOMETRÍA TROPICAL

Una incipiente área de las matemáticas permite entender desde una nueva perspectiva la geometría tradicional

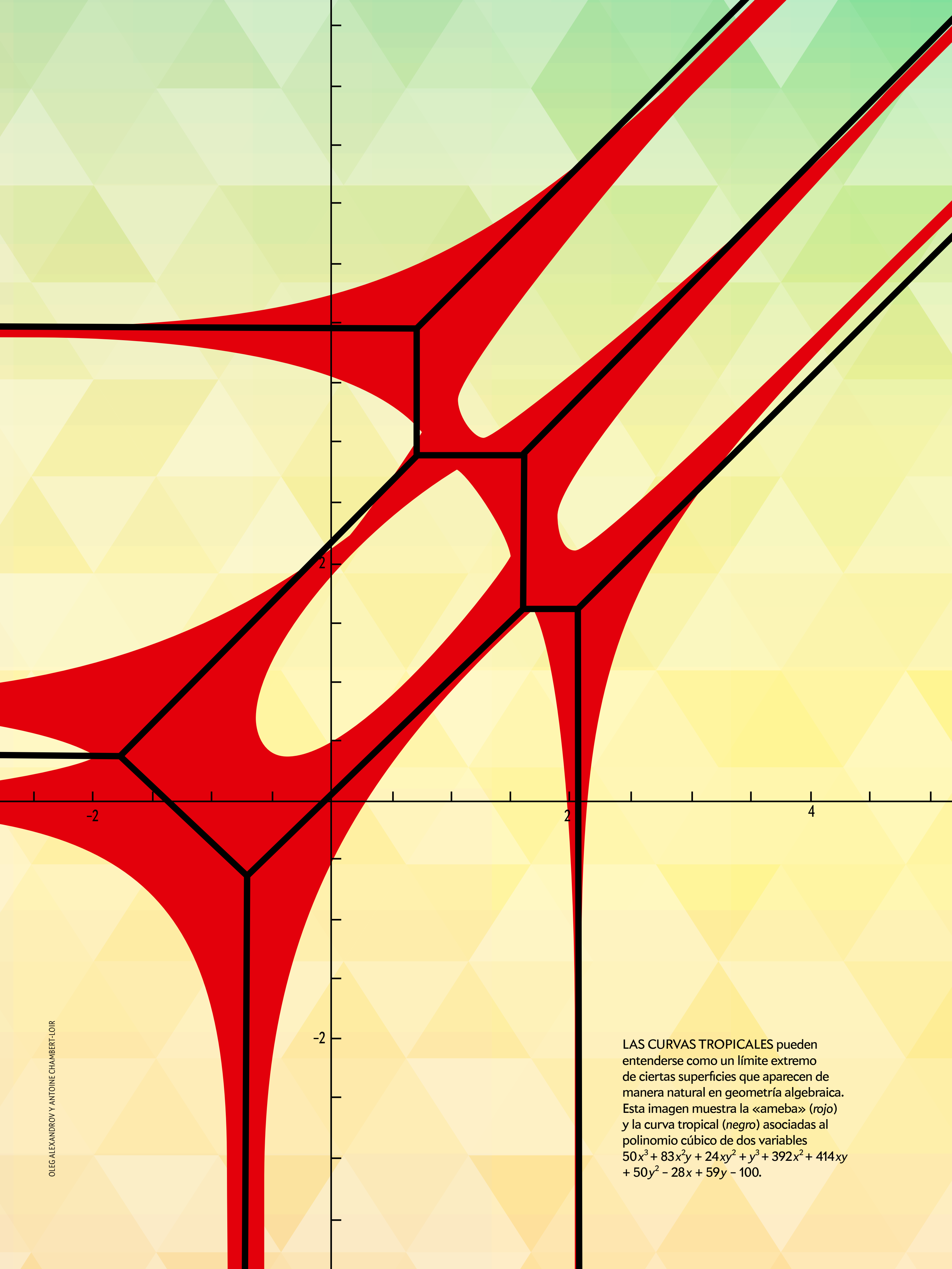
Antoine Chambert-Loir

-4

En matemáticas, para estudiar las propiedades de ciertos objetos, a menudo resulta conveniente considerar otros de naturaleza completamente distinta. Los ejemplos abundan. Uno de los más conocidos lo hallamos en los números complejos, los cuales se emplean con asiduidad para estudiar ecuaciones con coeficientes y variables reales. Es más, el uso de números complejos —ya sea en análisis, álgebra o geometría— es hoy tan universal que, sin ellos, las matemáticas actuales no existirían.

Una rama relativamente reciente de las matemáticas, la geometría tropical, puede verse de la misma manera. Este campo comenzó a emerger en los años ochenta del siglo pasado y se apoya en cierto tipo de álgebra empleada en varios contextos de la matemática discreta y la computación. Hoy constituye un área de investigación activa e interesante en sí misma, pero que al mismo tiempo resulta muy útil en otros dominios. Uno de ellos es la geometría algebraica, el estudio de aquellas curvas y formas geométricas que pueden definirse como el conjunto de puntos que resuelven ecuaciones polinómicas.

Los objetos que estudia la geometría tropical se denominan «curvas tropicales» (o, en general, variedades tropicales) y exhiben propiedades que en ocasiones son similares a aquellas que encontramos en geometría algebraica. Como resultado,



LAS CURVAS TROPICALES pueden entenderse como un límite extremo de ciertas superficies que aparecen de manera natural en geometría algebraica. Esta imagen muestra la «ameba» (*rojo*) y la curva tropical (*negro*) asociadas al polinomio cúbico de dos variables $50x^3 + 83x^2y + 24xy^2 + y^3 + 392x^2 + 414xy + 50y^2 - 28x + 59y - 100$.

el paso a través de la geometría tropical nos permite descubrir, calcular o demostrar, a veces de manera más sencilla, algunas propiedades de las curvas y superficies que aparecen en geometría algebraica. Un ejemplo nos lo proporciona la geometría enumerativa, la parte de la geometría algebraica centrada en contar puntos, curvas o superficies que verifican ciertas condiciones.

Antoine Chambert-Loir es profesor de matemáticas en la Universidad de París-Diderot. Sus investigaciones se centran en la geometría algebraica y aritmética.



PUNTOS Y CURVAS

Comencemos por el célebre postulado de Euclides que afirma que por dos puntos siempre pasa una recta y solo una. Ahora reemplacemos la recta por otro tipo de curva, como una circunferencia, y planteémonos las dos preguntas siguientes: ¿cuántos puntos del plano se necesitan para determinar de forma unívoca una circunferencia?, ¿cuántas circunferencias determinan n puntos? Observemos primero que por dos puntos A y B dados pasan una infinidad de circunferencias. Sin embargo, si consideramos un tercer punto C que no se halle alineado con los dos primeros, solo tendremos una circunferencia que pase por ellos: aquella que circunscribe al triángulo ABC.

La pregunta se torna algo más interesante si el tipo de curva considerada es una cónica. Como sugiere su nombre, estas curvas son las que se obtienen por la intersección de un cono y un plano. Pueden clasificarse en tres tipos: elipses, parábolas e hipérbolas. Las elipses (de las que la circunferencia puede entenderse como un caso particular) son fundamentales en mecánica celeste, ya que corresponden a las trayectorias que describen los planetas alrededor del Sol. También las parábolas son frecuentes en nuestra vida cotidiana, ya que la sección de las antenas de satélite adopta dicha forma.

En el siglo XVII, el matemático francés Blaise Pascal demostró que, por cinco puntos en los que no haya cuatro que estén alineados, pasa una y solo una cónica. Por tanto, una pregunta natural es si cabe encontrar enunciados análogos para otras familias de curvas.

Las rectas y las cónicas comparten una propiedad que observamos también en otros casos: son «curvas racionales»; esto es, podemos determinar las coordenadas de sus puntos usando fracciones racionales de una variable, a la que llamaremos t. (Una «fracción racional» en t es aquella formada por un cociente de polinomios en t.) Por ejemplo, si los puntos A y B tienen coordenadas (x_A, y_A) y (x_B, y_B), la recta que pasa por ellos puede representarse mediante la parametrización

$$x(t) = (1 - t)x_A + tx_B\,,$$
$$y(t) = (1 - t)y_A + ty_B\,.$$

A medida que el parámetro t va tomando valores en el conjunto de los números reales, los puntos $(x(t), y(t))$ recorren toda la recta AB.

La parametrización de una cónica es más sutil, pero puede deducirse a partir de una sencilla construcción geométrica. Por ejemplo, para la circunferencia de radio unidad centrada en el origen obtenemos las ecuaciones

$$x(t) = (1 - t^2)/(1 + t^2)\,,$$
$$y(t) = 2t/(1 + t^2)\,.$$

Al mismo tiempo, las curvas racionales pueden también describirse mediante una ecuación del tipo

$$F(x, y) = 0\,,$$

donde F representa un polinomio en x e y. Esta ecuación adopta la forma

$$ax + by + c = 0$$

en el caso de una recta (donde a, b y c denotan constantes), y

$$x^2 + y^2 - R^2 = 0$$

para una circunferencia de radio R centrada en el origen. El grado d del polinomio F es el grado de la curva racional: vale 1 para una recta y 2 para la circunferencia y el resto de las cónicas. No obstante, las rectas y las cónicas no son más que los primeros ejemplos de curvas racionales. Y, como no podía ser de otra manera, hace tiempo que los matemáticos se interesan por las curvas racionales de grados superiores.

En 1993, el matemático ruso Maxim Kontsévich, hoy catedrático del Instituto de Estudios Científicos Superiores (IHES), cerca de París, resolvió una cuestión candente por aquel entonces. Hemos visto que por dos puntos solo pasa una recta, y que por cinco solo pasa una cónica. El problema que afrontó Kontsévich planteaba determinar, para todo entero positivo d, el número N_d de curvas racionales de grado d que pasan por $3d - 1$ puntos. Tales números se conocen como «invariantes de Grómov-Witten». Proceden de consideraciones matemáticas más generales inspiradas por la teoría de cuerdas en física y toman su nombre de Mijaíl Grómov, quien trabajó también en el IHES, y de Edward Witten, físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Kontsévich logró demostrar una sorprendente fórmula de recurrencia, según la cual

$$N_d = \sum [a^2b^2C(3d-4, 3a-2) - a^3bC(3d-4, 3a-1)]N_aN_b\,,$$

donde $C(p, q)$ denota el número combinatorio correspondiente (los coeficientes del binomio de Newton: $p!/[q!(p-q)!]$) y donde la suma se extiende a todos los enteros positivos a y b tales que $a + b = d$.

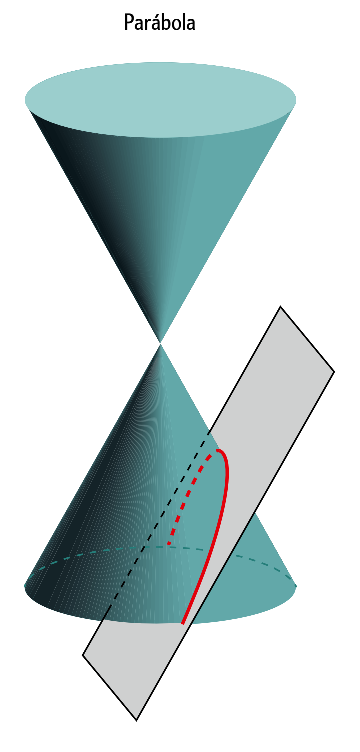
EN SÍNTESIS

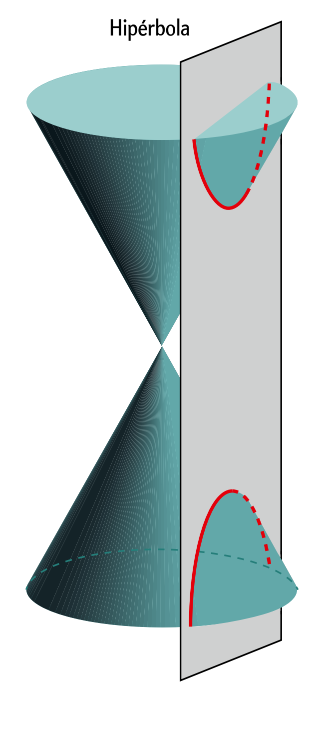
Una de las ramas centrales de la matemática moderna es la geometría algebraica. Esta disciplina se dedica a estudiar aquellas curvas y superficies cuyos puntos corresponden a las soluciones de ecuaciones algebraicas.

En los últimos años, los matemáticos han comenzado a explorar una curiosa generalización: la que se obtiene al tomar una expresión algebraica y reemplazar la suma y el producto por otras dos operaciones más exóticas.

La disciplina resultante se conoce hoy como «geometría tropical». Además de revestir un interés intrínseco, su estudio ha permitido abordar desde una óptica completamente nueva numerosos problemas de geometría algebraica.

Elipse





LAS CÓNICAS (*rojo*) corresponden a las curvas que pueden obtenerse a partir de la intersección de un cono y un plano. En función del ángulo de intersección, tales curvas se clasifican en tres: elipses (de las que la circunferencia es un caso particular), parábola e hipérbola. Al mismo tiempo, dichas curvas pueden describirse como el conjunto de puntos (x, y) que resuelven una ecuación polinómica de segundo grado, $F(x, y) = 0$. La geometría algebraica estudia las curvas y superficies que se obtienen al considerar expresiones generales de este tipo.

Dado que $N_1 = 1$, la fórmula de Kontsévich permite calcular N_d para cualquier valor de d. En particular, encontramos que $N_2 = 1$ (lo que concuerda con el resultado obtenido por Pascal en el siglo XVII) y que $N_3 = 12$; es decir, que por 8 puntos pasan 12 curvas de grado 3. Otros valores son $N_4 = 620$, el cual fue calculado en 1873 por el matemático danés Hieronymus Zeuthen; y $N_5 = 87.304$, obtenido poco antes de que Kontsévich presentara su fórmula. Otros valores que no se conocían hasta entonces y que pueden calcularse a partir de ella son, por ejemplo,

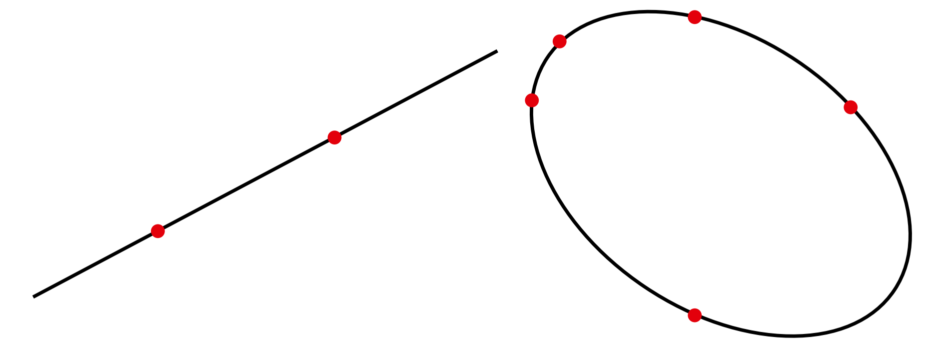
$$N_6 = 26.312.976\ ,$$
$$N_7 = 14.616.808.192\ ,$$
$$N_8 = 13.525.751.027.392\ .$$

El número $3d - 1$ que aparece en el problema resuelto por Kontsévich puede parecer misterioso. Pero para $d = 1$ y $d = 2$ encontramos respectivamente 2 y 5: el número de puntos necesarios para determinar una recta y una cónica, respectivamente. El hecho de que, en general, $3d - 1$ puntos determinen un número finito de curvas racionales tiene su origen en la cantidad de parámetros que hacen falta para describir dichas curvas.

AMEBAS Y ESQUELETOS

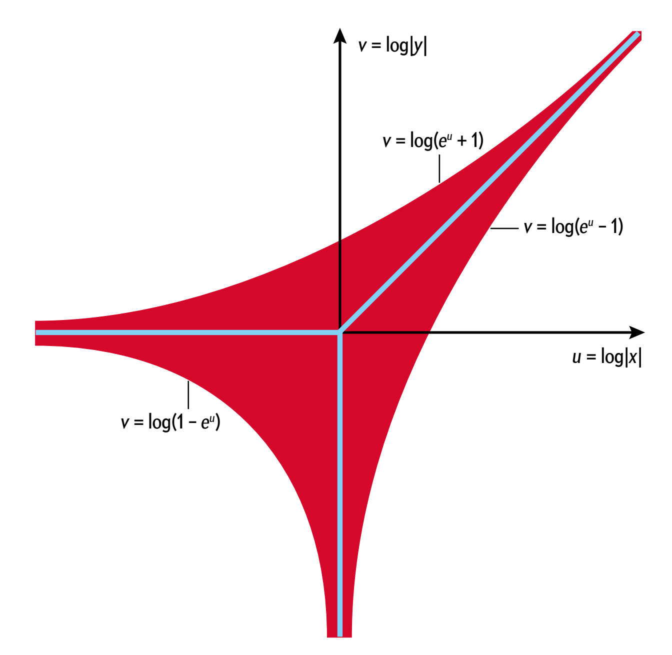
Unos años después del trabajo de Kontsévich, el problema pudo afrontarse desde un nuevo ángulo gracias a las curvas tropicales. ¿En qué consisten estos objetos?

Para definirlos, volvamos a las curvas racionales. Al igual que la recta y la circunferencia, las curvas racionales pueden definirse por medio de una ecuación polinómica de dos variables, $F(x, y) = 0$. Es posible generalizar la expresión anterior al caso en el que x e y toman valores complejos; esto es, números de la forma $a + ib$, donde a y b denotan valores reales e i representa la unidad imaginaria ($i^2 = -1$). En tal situación, cada una de las variables x e y corresponde en realidad a dos coordenadas reales: su parte real (a) y su parte imaginaria (b). Por tanto, ahora disponemos de cuatro coordenadas reales ligadas por una ecuación del tipo $F(x, y) = 0$, la cual equivale a dos ecuaciones distintas: una para la par-



UN PROBLEMA CLÁSICO en geometría consiste en determinar cuántas curvas de un cierto tipo pasan por un conjunto dado de puntos. Por dos puntos pasa siempre una única recta (*izquierda*). En cambio, en general hacen falta cinco para determinar una cónica (*derecha*). Uno de los problemas que la geometría tropical ha ayudado a analizar es qué ocurre en el caso de curvas de grado superior.

POUR LA SCIENCE/ADÈLE GALLÉ



EL ESTUDIO DE LA «RECTA» definida por la ecuación $x + y - 1 = 0$, donde x e y pueden tomar valores complejos, lleva a considerar de manera natural la región del plano mostrada aquí, conocida como «ameba» (*rojo*). Esta queda delimitada por las tres curvas cuyas respectivas expresiones se indican en la figura. Su «esqueleto» (*azul*) es la curva tropical asociada al polinomio $x + y - 1$. Dicha curva corresponde al conjunto de puntos (u, v) tales que el máximo de la terna $(u, v, 0)$ se alcanza en al menos dos de sus tres argumentos. La relación entre las variables (x, y) y (u, v) es de naturaleza logarítmica.

te real de F y otra para su parte imaginaria. Aunque seguiremos hablando de «curvas», cuatro variables con dos relaciones entre sí definen una superficie bidimensional en un espacio de cuatro dimensiones, algo que ya no resulta tan sencillo de visualizar.

El estudio de estas superficies presenta varias dificultades, pero a lo largo de los años se han desarrollado varios métodos para lograrlo. En los años noventa, a fin de visualizar el «tamaño» de los números complejos x e y que resuelven la ecuación polinómica $F(x, y) = 0$, los matemáticos de origen ruso Israel Guelfand, Mijaíl Kapránov y Andréi Zelevinsky propusieron usar coordenadas logarítmicas. En concreto, la idea consiste en dibujar el conjunto A_F de puntos u y v con coordenadas

$$(u, v) = (\log|x|, \log|y|),$$

donde x e y recorren las soluciones de la ecuación $F(x, y) = 0$, y $|x|$ denota el módulo del número complejo x ($\sqrt{a^2 + b^2}$; es decir, la distancia de x al origen en el plano complejo).

Consideremos el ejemplo de la ecuación correspondiente a la «recta» $x + y - 1 = 0$ (usamos comillas ya que x e y pueden tomar valores complejos y, por tanto, la ecuación representa una superficie más complicada en un espacio de cuatro dimensiones). Buscamos entonces parejas de números reales u y v, definidos arriba, tales que x e y satisfagan $x + y - 1 = 0$. En este caso, puede calcularse que los puntos (u, v) en cuestión forman una región del plano delimitada por tres curvas. Dichas curvas son las definidas por las ecuaciones

$$v = \log(e^u + 1) \text{ para todo } u,$$
$$v = \log(1 - e^u) \text{ para } u < 0,$$
$$v = \log(e^u - 1) \text{ para } u > 0$$

(*véase la figura de la izquierda*). La región resultante presenta tres extensiones que recuerdan a tentáculos o pseudópodos, razón por la que las superficies definidas de esta manera se conocen como «amebas».

A partir de estos pseudópodos podemos definir el «esqueleto» de la ameba. Aquí, el esqueleto se encuentra formado por tres semirrectas que parten del origen de coordenadas. Una forma de entender este objeto, propuesta por varios matemáticos y especialmente por Víctor Máslov y Oleg Viro, consiste en efectuar un cambio de escala y dibujar la misma ameba pero reemplazando los logaritmos naturales (de base $e = 2{,}718...$) por otros de base cada vez mayor. A medida que hacemos esto, la ameba se contrae más y más sobre sí misma y su figura se aproxima a la de su esqueleto (*véanse las figuras inferiores*).

ÁLGEBRA TROPICAL

Existe una manera más algebraica de entender el proceso que acabamos de describir. Para ello, primero hemos de recordar que los logaritmos convierten los productos en sumas: si $z = xy$, entonces

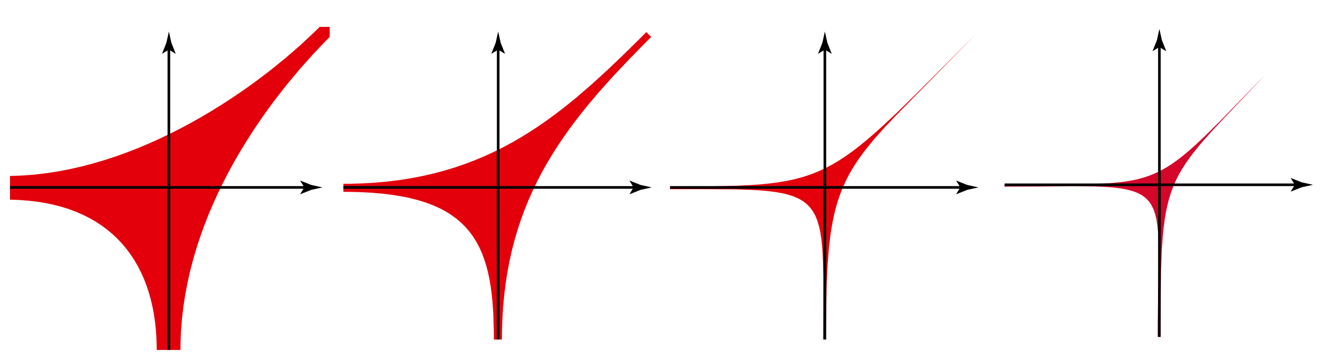
$$\log z = \log x + \log y.$$

Por tanto, si definimos las variables $u = \log x$, $v = \log y$ y $w = \log z$, tenemos que

$$w = u + v.$$

Para la suma hemos de considerar una transformación algo más exótica. Si ahora $z = x + y$, entonces

$$\log z = \log(x + y) = \log(e^{\log x} + e^{\log y}),$$



DADA UNA AMEBA (*rojo*), su esqueleto puede obtenerse como el límite en el que dicha región se contrae infinitamente sobre sí misma (*secuencia de izquierda a derecha*). Matemáticamente, dicho límite se obtiene cuando la base de los logaritmos se hace tender a infinito.

ANTOINE CHAMBERT-LOIR

lo que implica que

$$w = \log(e^u + e^v)\ .$$

Esta farragosa expresión se suaviza cuando efectuamos el cambio de escala mencionado antes. Si tomamos logaritmos en base b, la ecuación de arriba se convierte en

$$w = \log_b(b^u + b^v)\ .$$

Cuando b tiende a infinito, el lado derecho de esta expresión converge al mayor de los números u y v. Es decir, en el límite, tenemos que

$$w = \max(u\,,v)\ .$$

Así pues, el cambio de escala de Máslov y Viro (que, recordemos, transformaba la ameba en su esqueleto) equivale a reemplazar la suma y el producto por las leyes exóticas max y +, respectivamente. Acabamos de entrar de lleno en el mundo de la geometría tropical. Estas dos leyes que acabamos de introducir definen lo que hoy se conoce como álgebra tropical y, antaño, como «álgebra max-más».

Esta nueva álgebra puede aplicarse a cualquier expresión polinómica. Para ello, basta con tomar logaritmos y reemplazar la operación de suma por max y la de producto por la suma. De esta manera, un monomio de la forma

$$ax^n$$

se traduce en la expresión

$$\log|a| + nu\ ,$$

mientras que un polinomio como

$$-2 + 5x^2 - 4y^3$$

se convierte en

$$\max(\log 2\,, \log 5 + 2u\,, \log 4 + 3v)\ .$$

CURVAS TROPICALES

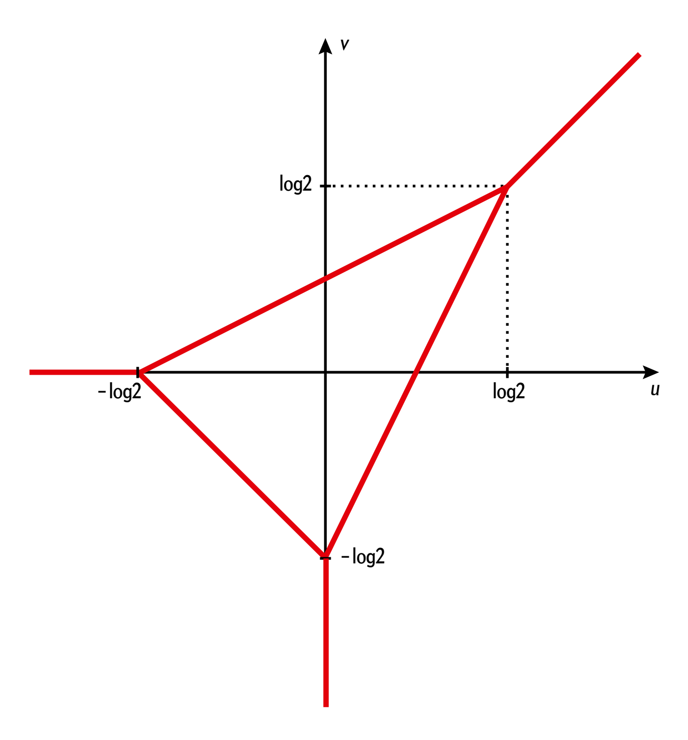
Apliquemos ahora nuestras nuevas reglas a la recta de ecuación $x + y - 1 = 0$. Al transformarla en álgebra tropical, obtenemos la expresión

$$\max(u\,,v\,,0)\ .$$

Esto nos proporciona la clave para entender el esqueleto de nuestra ameba. En efecto, las tres semirrectas que lo componen corresponden a los puntos de coordenadas $(u\,,v)$ tales que el máximo de la terna $(u\,,v\,,0)$ se alcanza en al menos dos de los tres argumentos. Por ejemplo, si el máximo se alcanza para u y v, eso significa que $u = v$ y que $u > 0$ y $v > 0$: la semirrecta diagonal del esqueleto. Dicho esqueleto es la curva tropical correspondiente a la ecuación $x + y - 1 = 0$.

Estas mismas consideraciones pueden generalizarse a cualquier ecuación polinómica, a la que siempre resulta posible asociar una ameba y su correspondiente esqueleto, o curva tropical. El estudio de estos objetos aplicado a polinomios F más generales constituye una rica disciplina de la matemática actual. Uno de los resultados conocidos —y que podemos constatar en nuestro ejemplo— es que la región del plano complementaria a la ameba consta de la unión de un número finito de dominios convexos. Esto último quiere decir que, dados dos puntos exteriores a la ameba, o bien podremos conectarlos por un segmento que no toca la ameba, o bien no podremos unirlos mediante ninguna curva continua exterior a la ameba.

ANTOINE CHAMBERT-LOIR



ESTA FIGURA LINEAL A TROZOS representa la curva tropical asociada al polinomio $F(x\,,y) = 1 + 2xy + x^3 + y^3$. Corresponde al conjunto de puntos $(u\,,v)$ tales que el máximo de la tétrada $(0\,,\log 2 + u + v\,, 3u\,, 3v)$ se alcanza en dos de los cuatro argumentos.

Consideremos ahora otro ejemplo algo más elaborado: el polinomio

$$F(x\,,y) = 1 + 2xy + x^3 + y^3\ .$$

Al igual que antes, la «tropicalización» de F se define tomando logaritmos y transformando las operaciones de suma y producto en max y +. Esto nos proporciona

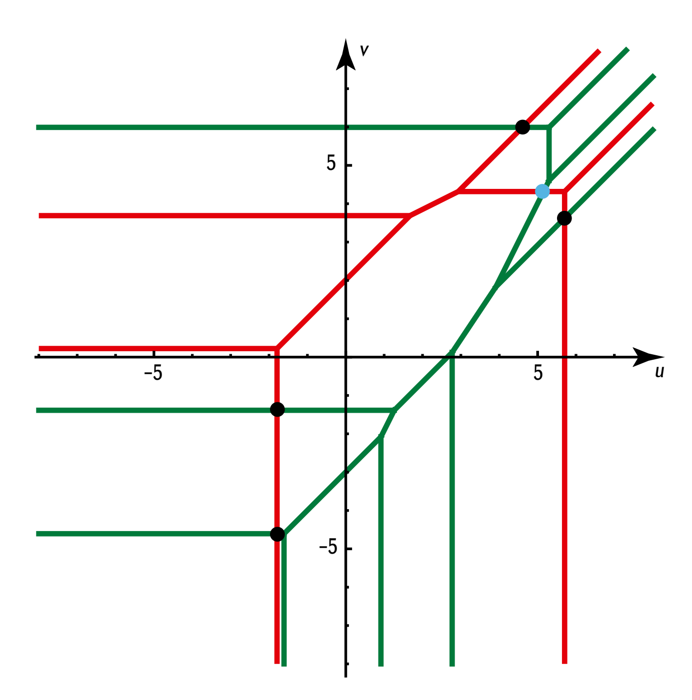
$$F_{\text{trop}}(u\,,v) = \max(0\,, \log 2 + u + v\,, 3u\,, 3v)\ .$$

La curva tropical correspondiente se define al igual que antes: como el conjunto de puntos del plano $(u\,,v)$ tales que al menos dos de los argumentos de $(0\,,\log 2 + u + v\,, 3u\,, 3v)$ alcanzan el máximo. Una vez más, la curva tropical se encuentra formada por varios fragmentos lineales, que en este caso corresponden a tres segmentos y tres semirectas (*véase la figura superior*). Esta linealidad por partes constituye una propiedad general de las curvas tropicales.

Otra característica, más difícil de describir, hace referencia a cierta «condición de equilibrio» en cada uno de los puntos donde coinciden varias líneas. Cada una permite definir un vector primitivo (uno cuyas componentes vienen dadas por números primos relativos), al cual la teoría atribuye además un peso. Dicho peso es siempre un entero positivo, y la condición de equilibrio mencionada estipula que, en cada vértice, la suma de tales vectores ponderados por sus respectivos pesos es siempre nula.

LA IMPORTANCIA DE LA GEOMETRÍA TROPICAL

¿Por qué prestar atención a las curvas tropicales? Una de las razones se debe a que estos objetos poseen propiedades de naturaleza esencialmente combinatoria y, al mismo tiempo, reflejan con bastante fidelidad la geometría de las curvas algebraicas subyacentes. En los últimos años, numerosos trabajos



DADAS DOS CURVAS TROPICALES, el número de puntos en el que se cortan viene dado por el producto de sus grados. Por ejemplo, la cónica tropical asociada al polinomio $x^2 + 4xy - 300x - 40y - 50$ (grado 2, *rojo*) se cruza con la cúbica tropical asociada a $x^3/8 + x^2y + 2xy^2 + y^3 + 2x^2 + 15xy + 400y^2 + 5x + 100y + 1$ (grado 3, *verde*) en 2 × 3 = 6 puntos. El punto de intersección próximo a (5 , 5) (*azul*) tiene multiplicidad dos (cuenta doble).

han extendido varios teoremas clásicos de la geometría algebraica al contexto de la geometría tropical. Este es el caso del teorema de Bézout, así llamado en honor al matemático francés del siglo xviii Étienne Bézout, el cual determina el número de puntos de intersección de dos curvas algebraicas en función de su grado. Su generalización tropical establece que el número de puntos de intersección de dos curvas tropicales es igual al producto de sus respectivos grados. La variante tropical no solo es más simple que la algebraica, sino que aporta un refinamiento: además del número de puntos de intersección, el teorema proporciona información sobre sus posiciones.

Pero, más importante aún, la geometría tropical ha permitido obtener nuevas demostraciones, más simples, de resultados complejos. La primera aplicación concierne a los invariantes de Grómov-Witten que mencionábamos al principio de este artículo. Debemos a Grigory Mikhalkin, de la Universidad de Ginebra, un notable «principio de correspondencia» que, esencialmente, establece una biyección entre las curvas algebraicas de grado d y sus análogas tropicales. Por otro lado, Andreas Gathmann y Hannah Markwig, de la Universidad de Kaiserslautern, demostraron hace unos años el equivalente tropical de la fórmula de Kontsévich. La combinación de ambos trabajos proporciona así una nueva demostración de la relación de recurrencia de Kontsévich.

Las técnicas tropicales han permitido asimismo calcular el análogo de los invariantes de Grómov-Witten para curvas definidas por ecuaciones con coeficientes reales. El recuento de estas curvas se halla plagado de misterios; sin embargo, Jean-Yves Welschinger, hoy en la universidad de Lyon, descubrió en 2002 que era conveniente contar algunas curvas positivamente y otras negativamente. Ello permite definir un nuevo invariante, W_d, análogo a N_d. A partir de ahí, Ilia Itenberg, de la Universidad de la Sorbona y la Escuela Normal Superior de París; Viatcheslav Kharlamov, de la Universidad de Estrasburgo; y Eugenii Shustin, de la Universidad de Tel Aviv, lograron establecer una relación de recurrencia de la que se desprende, por ejemplo, que $W_3 = 8$, $W_4 = 240$, etcétera. Así pues, si hay $N_3 = 12$ curvas cúbicas racionales que pasan por 8 puntos, solo $W_3 = 8$ son reales. Dado que en la regla para contarlas interviene un signo, esto significa que puede haber 8 curvas (si todas tienen el mismo signo), 10 (donde una tiene un signo opuesto al del resto) o 12 (con dos de signo opuesto a las demás). En general, el número preciso dependerá de las posiciones de los 8 puntos considerados. Por lo demás, en los últimos años se han conseguido demostrar varios resultados de primer orden relacionados con las propiedades de las curvas algebraicas, con la manera de parametrizarlas y con su descripción en términos de funciones racionales.

La razón por la que la geometría tropical, una rama incipiente de las matemáticas, resulta tan eficiente en ciertos contextos sigue siendo un tanto misteriosa. No obstante, recordemos que las curvas tropicales corresponden a un límite degenerado (aquel en el que la base de los logaritmos tiende a infinito) de las amebas algebraicas. Esta manera de proceder es ubicua en la geometría moderna: deformar el objeto de estudio hasta el extremo y estudiar aquellas propiedades que permanecen inalteradas durante la deformación. Al hacerlo, obtenemos modelos combinatorios simples que no solo nos permiten abordar preguntas clásicas, sino ir mucho más allá.

El resto de la historia de la geometría tropical está aún por escribir. Pero, para terminar, respondamos a una pregunta que seguro no habrá dejado de intrigar a muchos lectores: ¿por qué llamamos «tropical» al álgebra y a la geometría que hemos bosquejado aquí? En matemáticas, numerosos términos técnicos derivan del lenguaje ordinario sin que su sentido resulte evidente o tenga una conexión clara con la voz original. Eso mismo ocurre aquí. El álgebra formada a partir de las operaciones max y + se denominó en un principio «álgebra exótica» y, después, «álgebra max-más» hasta finales de los años ochenta. Pero más tarde pasó a conocerse como «álgebra tropical» gracias a algunos teóricos de la computación de la Universidad de París-Diderot, quienes se propusieron rendir homenaje a uno de sus colegas y pioneros del campo: el matemático brasileño Imre Simon. Sin duda, el exotismo muestra muchas facetas. IyC

PARA SABER MÁS

First steps in tropical geometry. Jürgen Richter-Gebert, Bernd Sturmfels, Thorsten Theobald, junio de 2003. Disponible en **arxiv.org/abs/math/0306366**

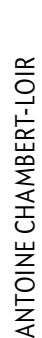
A bit of tropical geometry. Erwan Brugallé y Kristin Shaw en *The American Mathematical Monthly*, vol. 121, págs. 563-589, 2014.

A first expedition to tropical geometry. Johannes Rau, abril de 2017. Disponible en **www.math.uni-tuebingen.de/user/jora/downloads/FirstExpedition.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Alexander Grothendieck, de eminencia a eremita. Winfried Scharlau en *IyC*, junio de 2016.

Los problemas cuánticos inspiran nuevas matemáticas. Robbert Dijkgraaf en *IyC*, septiembre de 2017.



CLIMA

El rápido retroceso de los glaciares podría sumergir las costas antes de lo previsto

¿Se está desmoronando la Antártida?

Richard B. Alley

Los glaciares se están fundiendo y el nivel del mar está subiendo. Ya sabemos que el agua de los océanos invadirá la costa este de EE.UU., el golfo de México y otros litorales de todo el mundo. Lo que los científicos tratan de averiguar con urgencia es si esta inundación será mucho peor de lo previsto: un aumento de metros en lugar de centímetros. La gran pregunta es: ¿estamos entrando en una era en la que el hielo se derrite aún más rápido? De ser así, ¿cuánto se fundirá y a qué velocidad? La respuesta depende en gran medida de cómo responda el enorme glaciar Thwaites, en la Antártida occidental, a las decisiones humanas. Eso determinará si por las carreteras de la costa transitan coches deportivos o animales acuáticos.

PETER HORVATH *(ilustración)*; GETTY IMAGES *(mano, agua, edificios)*

EN SÍNTESIS

Los grandes glaciares de Groenlandia, como el Jakobshavn, se deslizan con rapidez hacia el océano y hacen que suba ligeramente el nivel del mar.

El enorme glaciar Thwaites, en la Antártida occidental, también ha aumentado su velocidad. Su destino depende de si retrocede hasta alcanzar la gran fosa subglaciar de Bentley.

Tal retroceso generaría imponentes acantilados de hielo que, al derrumbarse, podrían elevar el nivel del mar hasta 3,4 metros en tan solo unos pocos decenios.

El calentamiento global funde los glaciares en las áreas montañosas y expande los océanos, al tiempo que reduce el hielo en ambos polos. En los últimos 25 años, el nivel del mar se ha elevado, en promedio, unos 3 milímetros al año (o unos 30 centímetros por siglo). Si se derritieran el resto de los glaciares de montaña del planeta, el nivel del mar subiría otros 30 centímetros y pico. Pero los enormes casquetes glaciares de las regiones ártica y antártica producirían un aumento de más de 60 metros, así que cualquier pequeña variación que experimenten puede causar grandes cambios en nuestras costas. Los acantilados de hielo de varios kilómetros de longitud y cientos de metros de altura podrían irse fragmentando hasta desaparecer, lo que conllevaría una importante subida del nivel del mar.

Según las previsiones de los expertos, en lo que queda de siglo nos espera un aumento del nivel del mar relativamente modesto: tal vez 60 centímetros si el calentamiento es moderado y menos de 120 incluso si es intenso. Los científicos tienen pruebas sólidas de que estas cifras crecerán sensiblemente en los siglos venideros en caso de que el calentamiento continúe, pero el planeta podría entrar en una era de deshielo aún más rápido si retroceden los frentes glaciares.

Para averiguar si eso podría ocurrir, buscamos indicios en los cambios que ya se están produciendo, apoyándonos en lo que sabemos sobre el pasado de la Tierra y la física del hielo. Muchos de esos indicios proceden de los cambios drásticos que comenzó a sufrir el glaciar Jakobshavn, una parte importante del casquete glaciar de Groenlandia, hace unos 20 años. Debido a su propio peso, los glaciares se deslizan hacia el mar, donde sus frentes se funden o se desploman y son reemplazados por el hielo que fluye desde atrás. Cuando la pérdida de hielo es más rápida que este flujo, el frente retrocede, con lo que el casquete se contrae y aumenta el nivel del mar.

Durante la década de 1980, el glaciar Jakobshavn era uno de los más rápidos, y avanzaba veloz hacia la bahía de Baffin pese a estar retenido por una barrera de hielo (una extensión de hielo que flota en el mar). En los noventa, un calentamiento oceánico de aproximadamente un grado Celsius desmanteló la barrera y el glaciar respondió aumentando más de dos veces su velocidad hacia la costa. Hoy, el Jakobshavn presenta un importante retroceso y pérdida de espesor y es uno de los glaciares que más contribuye a la subida global del nivel del mar. El registro geológico de las rocas de la región demuestra que en el pasado se produjeron eventos análogos, y las observaciones actuales revelan que otros glaciares de Groenlandia sufren transformaciones similares.

Si el glaciar Thwaites, que es mucho mayor, se retirara del mismo modo que el Jakobshavn, tanto él como el hielo adyacente podrían desmoronarse en unas pocas décadas, lo cual elevaría el nivel del mar unos 3,4 metros. ¿Nos arriesgamos a una subida catastrófica del nivel del mar en un futuro cercano? ¿O estamos exagerando? ¿Cómo podemos predecir el comportamiento del Thwaites? Justo ahora estamos obteniendo datos.

GOFRES EN LA COSTA

Determinar la amenaza que supone el Thwaites no es sencillo. Para hacernos una idea, empecemos preparando unos gofres. La masa que vertimos en la gofrera se expande por la plancha cuadriculada. En términos físicos, el peso de la masa la empuja hacia el exterior, venciendo el rozamiento con la parrilla. Este avance se frena a medida que la masa se endurece al cocinarse, o si la retenemos con una espátula.

Los casquetes glaciares son como enormes gofres, anchos como un continente y con un espesor que puede superar los tres kilómetros. La nieve que cae sobre ellos se compacta y forma hielo debido al peso de las siguientes nevadas. A pesar de ser robustas —he aterrizado sobre ellas en pesados aviones militares equipados con esquíes—, estas montañas pueden expandirse. A menudo, su temperatura dista pocos grados del punto de fusión, por lo que el hielo está lo bastante blando como para descender lentamente desde la región central hacia los bordes, donde se funde y rompe con más facilidad. Las masas de hielo más gruesas o inclinadas, como las de Groenlandia o la Antártida, se desplazan más deprisa.

Por sí solo, un casquete glaciar crece hasta alcanzar el grosor y la pendiente suficientes para que el avance, la fusión y la ruptura del hielo compensen la continua acumulación de nieve. Su tamaño puede permanecer invariante durante mucho tiempo, pero eso no es lo que ocurre en nuestro planeta, cada vez más caliente. La humedad de la nieve que cae cada año sobre Groenlandia y la Antártida, que procede casi exclusivamente del mar, equivale a la evaporación de una capa de agua (del conjunto de los océanos) de poco más de 6 milímetros. Ahora mismo, los casquetes devuelven a los océanos un volumen de agua un 15 por ciento mayor mediante la escorrentía del agua de fusión o el desprendimiento de icebergs, lo que se traduce en una ligera subida del nivel del mar. Si el deshielo excede las nevadas durante suficiente tiempo, el casquete puede llegar a desaparecer. Al ritmo actual, harían falta casi 100.000 años para que pasara eso, pero la fusión se acelera si aumenta el calentamiento. Esa es la situación a la que nos enfrentamos hoy en día.



Richard B. Alley es profesor de geociencias en la Universidad Estatal de Pensilvania. Lleva más de cuarenta años estudiando los casquetes glaciares y ha asesorado al Gobierno estadounidense en distintas cuestiones relacionadas con el clima.

TERRIBLE BELLEZA

El avance de un casquete depende de su propia fuerza, de lo lubricada que esté su base y de si se encuentra retenido por una espátula; es decir, unido a una barrera de hielo flotante. El calentamiento atmosférico general puede reblandecer el hielo y descongelar las zonas adheridas a la roca subyacente, permitiendo que el casquete se deslice hacia el mar con mayor rapidez. Sin embargo, el calor tarda mucho en propagarse a través de una capa de más de tres kilómetros de hielo. De hecho, los grandes casquetes todavía no han acabado de calentarse como resultado del incremento de temperaturas atmosféricas que puso fin a la última glaciación ¡hace más de 10.000 años!

El hielo y su base pueden calentarse más rápido si el agua que se derrite en la parte superior penetra a través de grietas. En algunos lugares del casquete de Groenlandia, el agua de fusión se acumula en verano en hondonadas superficiales, formando grandes y hermosos lagos azulados. Al ser más densa que el hielo, el agua tiende a ensanchar las grietas, que pueden alcanzar el lecho rocoso y drenar el lago. Estos lagos pueden atravesar 800 metros de hielo o más y generar un caudal de agua mayor que el de las cataratas del Niágara. En una hora, la base puede calentarse tanto como en 10.000 años.

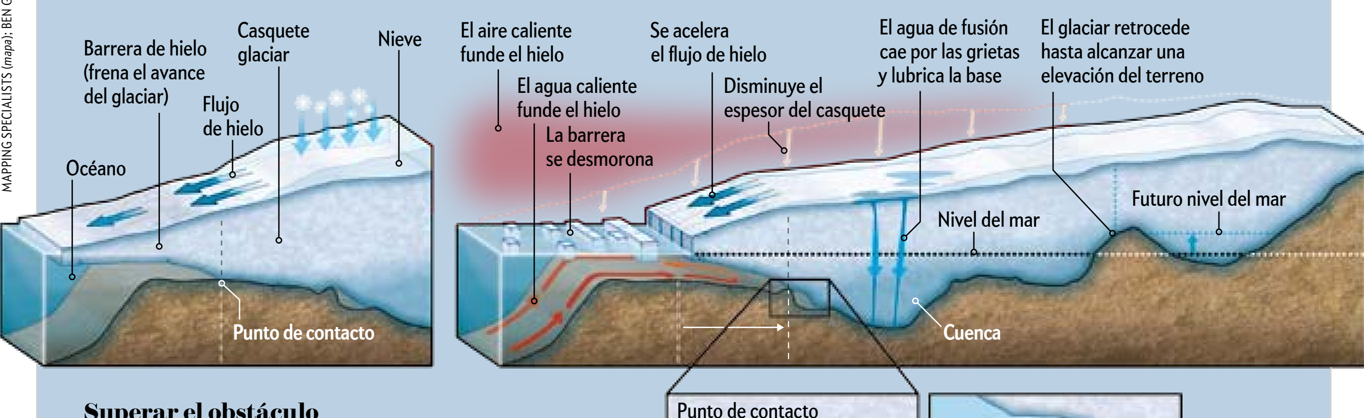
Este proceso es importante y le dedicamos mucha atención, pero tampoco es el más preocupante para los habitantes de las costas, ya que las irregularidades del terreno pueden impedir que el hielo se acelere hacia el mar.

Subida del nivel del mar

Los pequeños glaciares que drenan partes de la Antártida occidental pueden elevar un poco el nivel del mar si se funden. Pero los glaciares realmente grandes, como el de Pine Island y el Thwaites, suponen una amenaza mucho mayor (*mapa principal*). El espesor del segundo está comenzando a disminuir: su hielo fluye hasta el mar mientras el frente glaciar retrocede hacia el interior (*ilustraciones*). La ancha fosa subglaciar de Bentley, situada detrás del Thwaites, podría permitir que el glaciar retrocediera hasta las montañas Transantárticas, lo que causaría una subida del nivel global del mar de 3,4 metros.

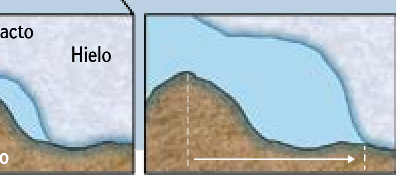
Así retrocede un casquete de hielo

Al tiempo que se acumula más nieve sobre el casquete, el peso del hielo hace que se deslice hasta el mar y se funda (*izquierda*). Los glaciares de la Antártida occidental están perdiendo más masa de la que ganan, lo que eleva ligeramente el nivel del mar. La barrera de hielo que flota en el océano frente al casquete ralentiza su avance, pero si el aire y agua calientes desintegran esa barrera, el glaciar se acelera y pierde espesor (*derecha*). El frente retrocede y, con él, el punto de contacto entre el hielo y el fondo marino. Si existe una cuenca profunda detrás de ese punto, el retroceso continuará sin impedimentos —produciendo un aumento importante del nivel del mar— hasta que el hielo alcance la próxima elevación tierra adentro o quede atascado en una prominencia del fondo oceánico (*inserto*).



Superar el obstáculo

Cuando un glaciar en retroceso alcanza una elevación del fondo marino, se genera fricción y el agua cálida no puede fundir el hielo de la base. Si rebasa el obstáculo, la fricción disminuye y el agua tiene vía libre.



FUENTES: «HOW MUCH, HOW FAST?: A SCIENCE REVIEW AND OUTLOOK FOR RESEARCH ON THE INSTABILITY OF ANTARCTICA'S THWAITES GLACIER IN THE 21ST CENTURY», T. A. SCAMBOS ET AL. EN *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE*, VOL. 153, JUNIO DE 2017; «SUB-ICE-SHELF SEDIMENTS RECORD HISTORY OF TWENTIETH-CENTURY RETREAT OF PINE ISLAND GLACIER», J. A. SMITH ET AL. EN *NATURE*, VOL. 541, ENERO DE 2017; CONSEJO DE INVESTIGACIÓN DEL MEDIO NATURAL DEL REINO UNIDO (*secciones*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*); BEN GILILAND (*ilustración*)

La amenaza es mayor si ese mismo mecanismo tiene lugar en una barrera de hielo. En las regiones muy frías, el hielo que fluye al océano se mantiene unido, flotando. Esas barreras de hielo casi siempre se desarrollan en bahías o fiordos protegidos y su movimiento se ralentiza debido a la fricción con la costa y a veces también con protuberancias del fondo marino, donde el hielo queda encallado localmente. La presencia de la barrera frena el avance del hielo continental hacia el mar.

El calentamiento del aire puede crear lagos sobre las barreras de hielo, y estas pueden desmoronarse si el agua se filtra a través de grietas. En 2002, la barrera Larsen B (situada en la península antártica, al norte del glaciar Thwaites) se desintegró casi por completo en tan solo cinco semanas: los icebergs se desprendían y caían como fichas de dominó. Como la barrera ya estaba flotando, su derrumbe no causó una subida del nivel del mar, pero permitió que el hielo continental situado tras ella fluyera hacia el océano entre seis y ocho veces más rápido (como si retirásemos la espátula, permitiendo el avance de la masa del gofre). Por suerte, no había mucho hielo detrás de la barrera Larsen B, en la estrecha península antártica, de forma que el nivel del mar no se elevó demasiado. Sin embargo, el evento reveló que las barreras de hielo pueden desintegrarse rápidamente y liberar los glaciares que retienen. Además, las barreras también pueden fundirse desde abajo debido al calentamiento del agua marina, como ocurrió en el Jakobshavn.

En ausencia de las barreras, los icebergs se desprenden directamente de los acantilados glaciares situados frente al mar. Aunque a los pasajeros de los cruceros que bordean Alaska y otras regiones les maraville, este proceso acelera la desaparición del casquete. Actualmente, en el Jakobshavn, los icebergs se desploman desde un acantilado que se alza más de 90 metros sobre el océano (como un edificio de 30 plantas) y se extiende nueve veces más por debajo de él. La caída de los icebergs lanza agua a alturas de hasta 50 pisos y genera terremotos detectables desde EE.UU.

Por el momento, la desaparición de las barreras de hielo y el desprendimiento de icebergs contribuyen moderadamente al aumento del nivel del mar. Pero en el Thwaites la elevación podría ser mucho más drástica, ya que un accidente geológico ha situado el glaciar al borde de un punto crítico, en la gran fosa subglaciar de Bentley.



EL AGUA DE FUSIÓN penetra en el casquete de Groenlandia y acelera su descenso hacia el mar. Eso mismo podría ocurrir en la Antártida.

KONRAD STEFFEN, CIRES Y UNIVERSIDAD DE COLORADO

SUPERAR OBSTÁCULOS

Una mañana del otoño de 1956, Charles Bentley (quien años después dirigiría mi doctorado) defendió su tesis en la Universidad de Columbia. Al día siguiente tomó un tren a Panamá y después un barco hacia el sur para participar en el Año Geofísico Internacional, un proyecto científico para estudiar el planeta. Pasó dos años en la Antártida occidental antes de regresar y enterarse de que aún no se había doctorado porque no había pagado la matrícula de la tesis. Mientras, él y su equipo atravesaron más de 4800 kilómetros de hielo por las vastas extensiones de la Antártida occidental, desde y hasta la base científica Byrd. (Bentley falleció en 2017, con 87 años.)

Entre sus numerosos descubrimientos, el más importante para nuestra historia tiene que ver con el espesor del hielo. Los investigadores provocaron pequeñas explosiones en la superficie y utilizaron sismómetros para analizar la propagación del sonido a través del hielo y su reflexión en el lecho rocoso. Sus datos demostraron que la Antártida occidental no consistía en un fino manto de hielo sobre un continente elevado. Por el contrario, comprobaron que la capa de hielo era muy gruesa y descubrieron la fosa subglaciar de Bentley. Allí, el lecho rocoso se hunde más de dos kilómetros y medio por debajo del nivel del mar (es el punto más profundo de la Tierra que no se encuentra bajo el océano) y el hielo que llena la fosa se eleva más de 1,6 kilómetros sobre el nivel del mar.

Bentley y sus colaboradores habían hallado un punto crítico. La gran fosa y las cuencas adyacentes están bajo el inmenso centro del casquete de la Antártida occidental. Si el frente del glaciar Thwaites retrocede desde la costa hasta la fosa, la pared de hielo podría alcanzar miles de metros de altura, extendiéndose desde muy por encima de la fosa hasta sus profundidades. Ese acantilado —mucho mayor que los que encontramos en el Jakobshavn o en cualquier otro lugar del planeta— podría romperse rápidamente y generar icebergs descomunales, que escaparían flotando de la fosa hasta llegar al océano y aumentarían notablemente el nivel del mar.

Décadas de investigaciones han demostrado la importancia de ese mecanismo. John Anderson, que en 2018 se jubiló de la Universidad Rice, y sus doctorandos cartografiaron la plataforma continental bajo el océano Antártico, empleando un sónar de barrido lateral y otros instrumentos. El hielo de la Antártida se expandió muchos kilómetros en todas direcciones durante las glaciaciones y se retiró cuando estas concluyeron. Las huellas que quedaron en los sedimentos del fondo oceánico (que en el pasado fue el lecho sobre el que se deslizaban los casquetes) nos revelan la historia de estas grandes masas de hielo.

Una de esas historias es que los casquetes arrastran sedimentos conforme avanzan hacia el mar. El hielo se estabiliza cuando alcanza una elevación local del fondo marino y va apilando allí nuevos sedimentos hasta formar altos «bancos morrénicos» (*moraine shoals*): largos muros rocosos que se forman donde termina el glaciar. El hielo puede permanecer en esa posición durante cientos o miles de años. Pero, con el suficiente calentamiento, el hielo retrocede y desciende por la pendiente del lecho rocoso al valle situado tras la morrena. Por lo general, el hielo no vuelve a estabilizarse hasta alcanzar la siguiente cresta, que a menudo se halla a gran distancia. Mientras tanto, los icebergs flotan sobre la morrena abandonada, que aún se halla bajo el nivel del mar, y se adentran en el océano.

Ese proceso se observa hoy en muchos puntos de la Antártida y Groenlandia. El glaciar Jakobshavn ha «superado el obstáculo» de un antiguo banco morrénico y retrocede por su fiordo en forma de valle, en dirección al gran casquete. Cuando los primeros exploradores europeos llegaron al área donde hoy se encuentra Glacier Bay, en Alaska, estaba ocupada por un enorme glaciar

que terminaba en un gran banco morrénico. Desde entonces, el hielo ha retrocedido unos 100 kilómetros desde esa cresta hasta alcanzar la siguiente elevación del terreno, que corresponde a la actual ribera de la hermosa bahía.

Por fortuna, la mayoría de estos retrocesos no afectan demasiado al nivel global del mar. Y es que incluso un glaciar del tamaño de Glacier Bay es pequeño en comparación con el conjunto de los océanos. El Jakobshavn no es más que uno de las decenas de grandes desagües naturales que rodean el casquete de Groenlandia, pero estos no desestabilizan enseguida a sus vecinos de los fiordos adyacentes ni penetran demasiado hacia el interior. De forma similar, la Antártida se drena mediante un buen número de glaciares que descienden por sus propios «valles-gofrera». Con el suficiente calentamiento, muchos de ellos podrían retraerse al unísono, pero individualmente no ejercen una gran influencia sobre los océanos.

La historia es diferente para la fosa de Bentley, en la Antártida occidental, y algunas otras regiones profundas de la Antártida oriental, como las cuencas de Wilkes y Aurora. El retroceso a través de una de ellas hasta la siguiente elevación del terreno tendría repercusiones globales. Los modelos indican que el Thwaites es el que tiene más probabilidades de alcanzar la fosa de Bentley y las cuencas que conectan con ella. Si comenzara a retroceder hacia el interior, como el Jakobshavn, la fusión de este glaciar podría elevar el nivel del mar 3,4 metros antes de estabilizarse al otro lado de la fosa. Las cuencas de la Antártida oriental podrían causar una mayor subida del nivel del mar que el Thwaites, pero se requeriría un calentamiento más intenso para que esos glaciares rebasaran sus obstáculos.

Este escenario no tiene nada de extraño. Si el calentamiento es suficiente, el hielo retrocede, por lo general hasta la siguiente elevación del terreno. Este fenómeno se ha observado una y otra vez en el pasado y en el presente. Si el glaciar Thwaites se calienta tanto como para empezar a comportarse como el hielo de Groenlandia y Alaska, debería retraerse.

¿UN FUTURO FRACTURADO?

¿A qué velocidad se retiraría el Thwaites? ¿Cuánto calentamiento podemos generar antes de que comience a hacerlo? David Pollard, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Robert M. DeConto, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, han programado un modelo para el flujo de hielo que incorpora los principios físicos relevantes y que puede ejecutarse lo bastante deprisa (en ordenadores avanzados) para estudiar cómo cambian los casquetes durante largos periodos de tiempo. Yo los ayudé con la física del desprendimiento de icebergs desde grandes acantilados de hielo tras la ruptura de las barreras, sobre todo en los casos donde el agua de fusión de la superficie abría grietas.

Pollard y DeConto optimizaron el modelo para que encajara con los datos del pasado geológico y les permitiera evaluar las consecuencias de distintos grados de calentamiento. Determinaron que, aun en caso de un calentamiento rápido, es probable que dispongamos de algunos decenios antes de que el Thwaites comience a desmoronarse como consecuencia de la desaparición de su barrera de hielo y del ensanchamiento de las grietas causado por el agua de deshielo. El Thwaites tardaría cerca de un siglo en colapsar del todo. Sin embargo, los científicos ignoraban a qué velocidad se rompería el hielo, así que establecieron como límite superior el valor alcanzado por el Jakobshavn en Groenlandia (una velocidad que ya ha superado brevemente). Y el Thwaites, debido a su mayor espesor, podría formar paredes mucho más altas que las del Jakobshavn. Los acantilados más altos tienden a romperse más rápido (una de las razones por las que los ingenieros no dejan acantilados, sino laderas, junto a las autopistas). Así que podríamos estar subestimando el peor de los casos, aunque en realidad no estamos seguros.

Si bien se trata de un buen modelo, seguramente no será la última palabra de Pollard y DeConto u otros investigadores. Aún quedan esperanzas, por ejemplo, de que el Thwaites pudiera estabilizarse en una cresta más profunda situada en la pendiente de bajada a la fosa, por detrás de su posición actual, antes de seguir retrocediendo. También podría ocurrir que se desprendieran icebergs y se acumularan durante un tiempo detrás de la cresta actual, donde el hielo comienza a flotar, ayudando a reconstruir una barrera que mitigase la pérdida de hielo.

Para abordar esas y otras cuestiones, la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. y el Consejo de Investigación del Medio Natural del Reino Unido, junto a otros colaboradores internacionales, han puesto en marcha un gran proyecto sobre el glaciar Thwaites que nos ayudará a predecir mejor su futuro.

Puede que algunas preguntas sigan siendo difíciles de responder. Pensemos, por ejemplo, en todas las tazas de cerámica que hemos visto caer al suelo: algunas rebotan, otras se rajan, en otras se rompe un trozo y otras se hacen añicos. Conocemos y sabemos calcular los procesos físicos que rigen esas formas de fractura, así que es posible predecir el comportamiento promedio de un gran número de tazas. Pero uno no pondría en riesgo su carrera, ni nada importante, tratando de vaticinar el destino de la siguiente taza que impacte contra el suelo.

En gran medida, el futuro del Thwaites depende de las fracturas. ¿Se separarán la barrera y el hielo que hoy la alimenta, de modo que el glaciar rebase el obstáculo y retroceda a las cuencas profundas? ¿Se desprenderán rápidamente enormes icebergs si la desaparición de la barrera genera a lo largo del frente glaciar un acantilado más alto que cualquiera de los que hay ahora mismo en la Tierra, causando el retroceso más rápido que hayamos visto jamás? El agua de deshielo desempeña una función importante, pero ¿cuánta escapará al mar en forma de ríos y cuánta se filtrará en la nieve y se volverá a congelar? ¿A qué velocidad se calentará el aire? Después de todo, el comportamiento de las tazas resulta más fácil de predecir.

Si el mundo es capaz de aunar esfuerzos, la ralentización y detención del calentamiento causado por las emisiones de gases de efecto invernadero atenuará la subida del nivel del mar y los crecientes costes asociados a los daños en el litoral. Pero si el Thwaites se dispone a retroceder bruscamente, frenar el calentamiento limitando el impacto de las actividades humanas podría ser muchísimo más valioso. IyC

PARA SABER MÁS

Oceanic forcing of ice-sheet retreat: West Antarctica and more. Richard B. Alley et al. en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 43, págs. 207-231, mayo de 2015.
Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Robert M. DeConto y David Pollard en *Nature*, vol. 531, págs. 591-597, marzo de 2016.
How much, how fast?: A science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites Glacier in the 21st century. T. A. Scambos et al. en *Global and Planetary Change*, vol. 153, págs. 16-34, junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

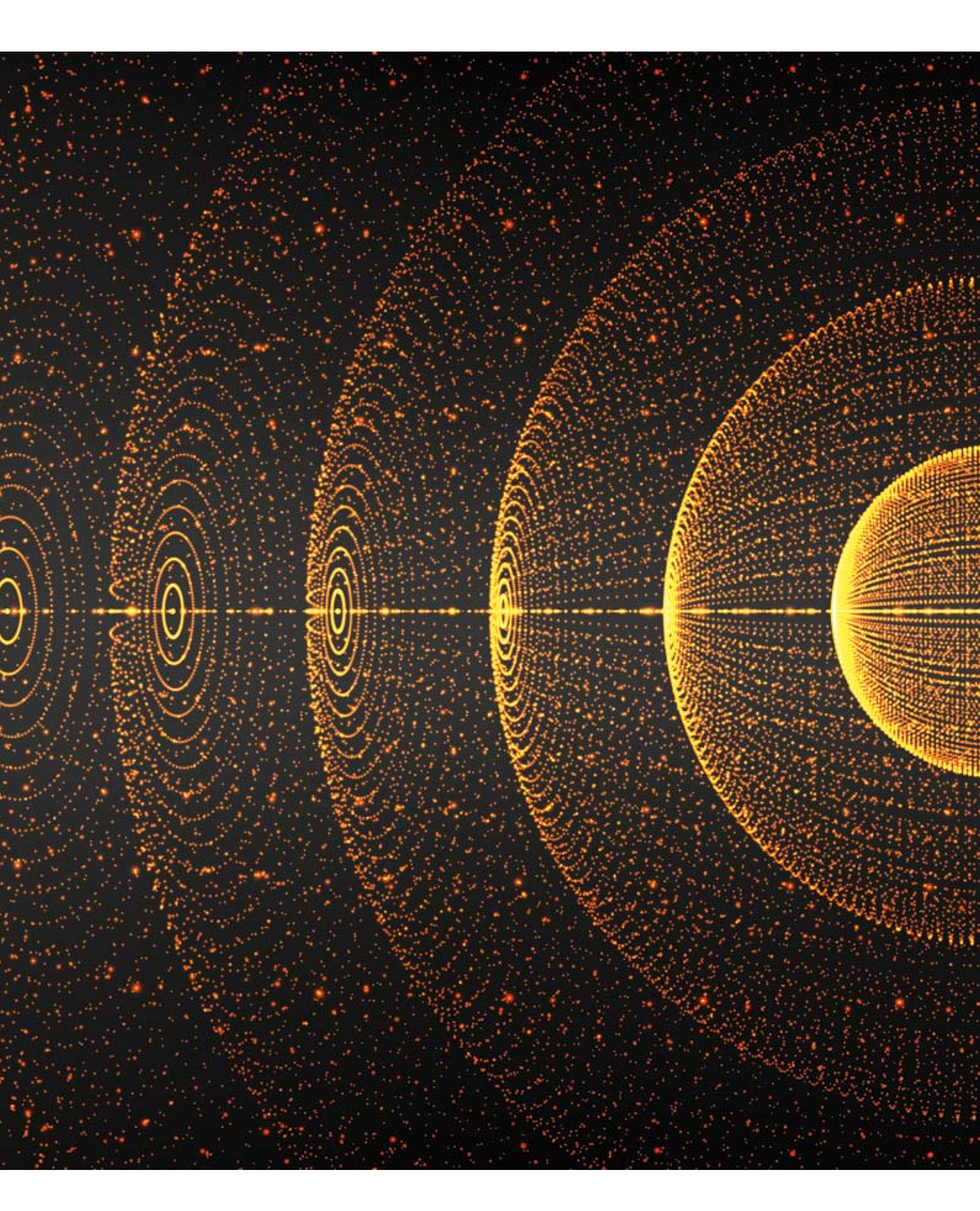
Dinámica de los casquetes glaciales. Robin E. Bell en *IyC*, abril de 2008.
La fusión de la Antártida en directo. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2012.

FÍSICA TEÓRICA

LA ARMONÍA EN LAS LEYES DE LA NATURALEZA

El premio nóbel Frank Wilczek reflexiona en esta entrevista sobre la estética de las leyes naturales y sobre las principales incógnitas a las que se enfrenta la física fundamental en el siglo XXI

Manon Bischoff y Robert Gast



FRANK WILCZEK, CATEDRÁTICO DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS, nació en Nueva York en 1951. Cuando contaba 22 años de edad demostró junto con su director de tesis, David Gross, que la interacción nuclear fuerte es «asintóticamente libre»: una propiedad clave que implica que, cuando dos quarks se hallan muy próximos entre sí, apenas interaccionan uno con otro. Aquel trabajo fue uno de los grandes logros conceptuales que ayudaron a apuntalar el modelo estándar de la física de partículas, la teoría moderna que describe todas las partículas elementales conocidas. Por esa razón, en 2004 Wilczek recibió el premio Nobel de física junto con Gross y David Politzer, del Instituto de Tecnología de California. Ampliamente reconocido como uno de los físicos teóricos más influyentes de las últimas décadas, Wilczek ha destacado por la originalidad de sus investigaciones en física de partículas y física de la materia condensada. En esta entrevista desgrana algunos aspectos del estado actual de ambas disciplinas, considera los retos a los que deben hacer frente y reflexiona sobre el papel de la simetría en las leyes de la naturaleza.

Profesor Wilczek, en un artículo publicado en 1991 en esta revista hablaba usted sobre los «alones» (*anyons*, en inglés), un fenómeno predicho en física de la materia condensada. En 2004 obtuvo el premio Nobel por sus investigaciones en física de partículas. Es evidente que se siente muy cómodo en ambos campos. ¿Cuál de ellos recomendaría a un estudiante de física hoy?

Dependería de qué tipo de persona fuera. Si le gustase aplicar la mecánica cuántica y reflexionar sobre sus maravillosos conceptos, la física de la materia condensada sería el campo apropiado. La física de partículas, por otro lado, goza de la fascinación de lo desconocido. En último término, no se trata tanto de construir sobre conceptos ya establecidos como de pensar otros nuevos. Su meta es descubrir las leyes últimas que gobiernan la naturaleza.

En los últimos cincuenta años usted y sus colegas se han aproximado a ese objetivo. Han desarrollado el modelo estándar de la física de partículas, algo así como el conjunto de reglas que rigen el mundo a escala microscópica. En su libro* El mundo como obra de arte *(Crítica, 2016) escribe que el universo se nos muestra como una obra artística. ¿Cómo llega a esa conclusión?

Las leyes de la naturaleza que conocemos resultan ser extraordinariamente simétricas. Esto raya en lo milagroso. En particular, si nos fijamos en la cromodinámica cuántica, la parte del modelo estándar que describe la interacción nuclear fuerte, podemos decir que sus leyes encarnan casi a la perfección un principio de simetría.

¿Qué quiere decir exactamente?

Al suponer la existencia de una simetría de cierto tipo, obtenemos de forma casi automática las propiedades de las partículas y sus interacciones. En el mundo real encontramos una copia tan extraordinaria de la teoría, una armonía tal entre los conceptos y el mundo, que, en mi opinión, se alcanzan niveles propios del arte.

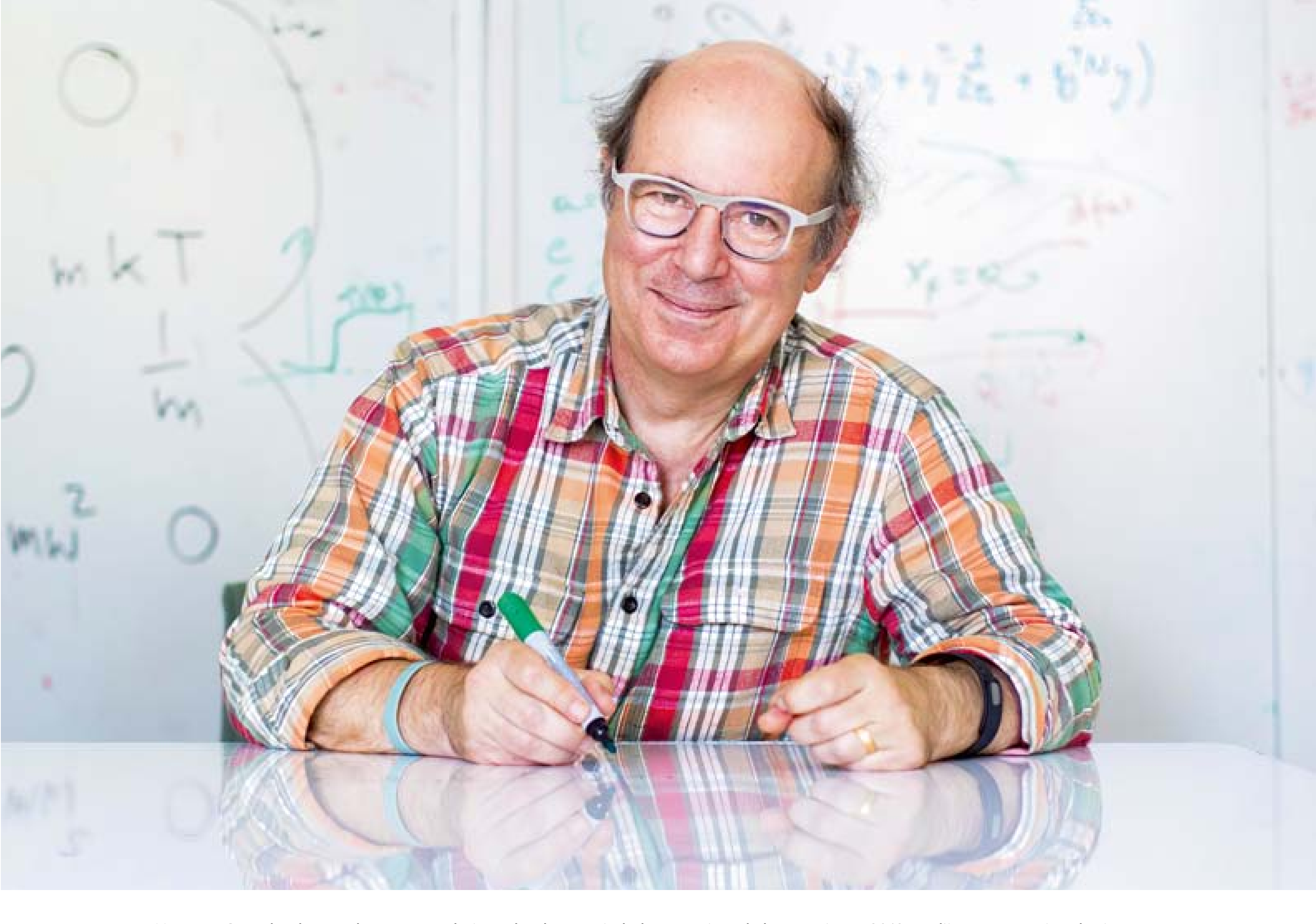
EN SÍNTESIS

En los años setenta Frank Wilczek contribuyó a esclarecer la estructura matemática de las interacciones fuertes. Aquel trabajo, por el que más tarde obtendría el premio Nobel, resultó clave para apuntalar el modelo estándar de la física de partículas.

Además de por otros resultados de primer orden en física de partículas, especialmente en cromodinámica cuántica, Wilczek ha destacado por sus aportaciones a la física del estado sólido y al estudio de las fases cuánticas de la materia.

En esta entrevista el investigador habla sobre la estructura última de las leyes físicas y sobre algunas prometedoras líneas de investigación futuras, como la búsqueda de materia oscura o las posibilidades de la computación cuántica.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DAMIENGESO/ISTOCK



FRANK WILCZEK ha destacado por sus trabajos sobre las propiedades cuánticas de la materia. En 2012 predijo un nuevo tipo de sistemas físicos a los que bautizó como «cristales temporales». Su existencia fue demostrada experimentalmente en 2017.

NIKLAS BJÖRLING, UNIVERSIDAD DE ESTOCOLMO

¿Muestra la naturaleza un «plan maestro»?
Sí, pero eso no es todo. A partir de unos pocos conceptos básicos podemos construir gigantescas estructuras dotadas de significado y coherencia interna. La química, por ejemplo, puede derivarse a partir de la electrodinámica y las reglas de la física cuántica. Cuando juntamos los elementos adecuados, conseguimos moléculas y, en algún momento, también vida. Ello recuerda a las catedrales. También ellas están construidas por unidades simples, pero la complejidad de su belleza nos fascina.

Si el universo es una obra de arte, ¿quién es el artista?
No creo en la visión simplista de un creador que hace al ser humano a partir de barro. Si hay un creador, tiene que ser algo mucho más abstracto. Sinceramente, soy muy prudente a la hora de usar ese concepto. Creo sin embargo que la idea de que todo es interdependiente y que el conjunto es más que la suma de las partes cobra completo sentido cuando nos preguntamos por el origen del cosmos.

Algunos de sus colegas de profesión argumentan que el universo surgió a partir de la nada y que, por tanto, no hay necesidad de un creador.
Sobre este aspecto hay ideas diferentes que no debemos confundir. Una de ellas afirma que, justo después de la gran explosión, el universo se encontraba en un estado muy energético y dotado de una gran simetría. A continuación, el cosmos «descendió» hacia un estado estable y de energía menor, y fue entonces cuando apareció la materia que conocemos. Pero, para mí, llamar a este escenario «creación a partir de la nada» es abusar del significado de la palabra *nada*.

¿Qué ocurre con las teorías de la inflación eterna y del multiverso? Estas sugieren la existencia de un número inimaginable de otros universos, cada uno de los cuales tendría sus propias leyes físicas.
Se trata de teorías científicamente legítimas, aunque son muy especulativas y van mucho más allá del modelo estándar. Hoy por hoy contamos con muy pocos indicios experimentales que las apoyen. Incluso para la versión básica y comúnmente aceptada de la inflación, creo que las pruebas de las que disponemos son bastante débiles. Ni siquiera sabemos cuál fue el campo cuántico responsable de la inflación ni a qué escala de energías ocurrió dicho proceso.

¿Tiene dudas de que la inflación haya tenido lugar?
La idea podría muy bien ser correcta. Los argumentos a su favor son coherentes y hay también algunas pruebas indirectas. Pero, en general, diría que aún es muy pronto para construir castillos en el aire a partir de ellas. Deberíamos buscar pruebas experimentales más sólidas.

Entonces, ¿la obra de arte de la que habla está aún incompleta?
Sí. Aún faltan una gran cantidad de elementos que completarían nuestra imagen del universo. Un problema concreto que deberíamos resolver es el de la materia oscura. Sabemos muy bien en qué consiste la materia ordinaria, aquella de la que están hechas las personas, los planetas y las estrellas. Pero parece que la materia oscura, al menos en lo que se refiere a la masa, es mucho más abundante que la ordinaria. Y, sin embargo, apenas tenemos una idea muy vaga acerca de su composición. Si me pregunta, creo que hay buenas posibilidades de que lleguemos a averiguarlo de aquí a unos años.

¿Cuál es su teoría preferida para explicar la materia oscura?
Podría estar hecha de partículas masivas que interaccionan débilmente, o WIMP (por sus siglas en inglés), las cuales aparecen en numerosas extensiones supersimétricas del modelo estándar.

Pero es también posible que la materia oscura se encuentre formada por otro tipo de partículas que usted contribuyó a estudiar durante los años setenta, ¿cierto?
¡Sí, los axiones! Estos son por supuesto mis favoritos. En su momento tuve el honor de darles nombre. Para ello me inspiré en una marca de detergente, ya que la existencia de los axiones «lavaría» uno de los problemas de los que adolece la teoría de las interacciones fuertes, conocido como «problema CP fuerte». Además, los axiones estarían asociados a una nueva simetría. Ambas razones los convierten en alternativas muy interesantes para explicar la materia oscura.

Si la materia oscura resultara estar formada por WIMP, ¿sería una decepción?
Si las WIMP existieran sería estupendo y su descubrimiento supondría un resultado fantástico. Pero, dado que aún no se han detectado, hemos de mantener nuestro entusiasmo bajo control. En cualquier caso, resolver el problema de la materia oscura es, para mí, la gran esperanza de completar en un futuro cercano nuestra imagen del microcosmos.

Numerosos físicos esperan que, a largo plazo, podamos aprender algo sobre la gravedad cuántica. Esta teoría describiría tanto el universo justo después de la gran explosión como el interior de los agujeros negros. ¿Cuál es, a

Glosario

Alón: Estado colectivo de los electrones de un sólido que puede describirse matemáticamente como si se tratase de una sola partícula. Su propiedad principal reside en que su espín puede tomar cualquier valor, no solo los valores enteros o semienteros que caracterizan a las partículas elementales.

Ángulo de Cabibbo: Parámetro del **modelo estándar** que mide la probabilidad con que los quarks *arriba* y *encanto* (*u*, *c*) se transmutan en quarks *abajo* y *extraño* (*d*, *s*), y viceversa.

Axión: Partícula elemental hipotética que podría componer la materia oscura. Fue postulada en los años setenta del siglo pasado como parte de una propuesta para resolver el llamado **«problema CP fuerte»**, un importante rompecabezas teórico de las interacciones fuertes.

Covariancia general: Principio de **simetría** en el que se apoya la teoría de la relatividad general de Einstein, la teoría moderna de la gravedad. Según él, las leyes de la naturaleza deben tomar la misma forma con independencia del sistema de coordenadas espaciotemporales que empleemos para describir los fenómenos físicos.

Inflación: Proceso hipotético por el que el universo habría experimentado una breve fase de expansión acelerada justo después de la gran explosión. La idea consigue explicar de manera natural varias propiedades del universo actual.

Modelo estándar: Teoría que describe todas las partículas elementales conocidas y tres de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza: el electromagnetismo, la interacción nuclear débil y la interacción nuclear fuerte.

Problema CP fuerte: En principio, el **modelo estándar** permite la existencia de algunos procesos mediados por la interacción fuerte que, sin embargo, no se observan en la naturaleza. Tales procesos están asociados con dos **simetrías** denominadas, respectivamente, «conjugación de carga» (C) y «paridad» (P). Uno de ellos es la existencia de un momento dipolar eléctrico del neutrón, algo jamás detectado. El hecho de que este fenómeno no se haya observado indica que cierto parámetro del modelo estándar ha de tomar un valor extremadamente próximo a cero. Una explicación postula que dicho parámetro se halla asociado a un **campo de energía** que, en el universo primitivo, acabó adoptando de manera natural dicho valor. En el proceso se habría producido un ingente número de **axiones**.

Simetría: En el caso de un sistema físico, una simetría es cualquier tipo de transformación del sistema que no altera sus propiedades. Por ejemplo, decimos que una esfera es simétrica bajo rotaciones ya que su aspecto sigue siendo el mismo aunque la giremos. En el caso de una teoría, el concepto es análogo, si bien las transformaciones hacen referencia a cambios en la descripción matemática del modelo.

Supersimetría: Un tipo de **simetría** matemática postulada en algunas teorías físicas. Si la naturaleza fuese supersimétrica, por cada tipo de partícula perteneciente a la familia de los bosones (partículas con espín entero) debería existir otra de tipo fermiónico (con espín semientero), y viceversa. Esta idea se halla en la base de una de las generalizaciones del **modelo estándar** más estudiadas durante las últimas décadas.

Teoría cuántica de campos: Base matemática del **modelo estándar** que compatibiliza las leyes de la mecánica cuántica con las de la teoría especial de la relatividad. Según ella, las partículas aparecen como excitaciones de un campo de energía.

su juicio, la mejor candidata para una teoría cuántica de la gravedad?
Opino que las ideas más prometedoras son las surgidas en el contexto de la teoría de cuerdas. Sin embargo, aún deben concretarse más. Creo que, al respecto, todavía no se ha descubierto la idea decisiva. Podría estar escondida en el seno de la teoría de cuerdas, pero considero que aún no se ha dado con ella.

La teoría de cuerdas describe el mundo como un universo de diez dimensiones espaciotemporales, de las cuales solo serían visibles las cuatro que conocemos. ¿No es esta una idea bastante concreta?
Permítame ser más claro. La idea básica que subyace a la teoría de la relatividad general de Einstein es totalmente transparente. Se trata del principio de covariancia general, el cual se halla relacionado con cierta simetría y con principios geométricos. En la teoría de cuerdas todavía no encuentro una idea central similar. Más allá de esto, resulta muy difícil extraer consecuencias de la teoría. Ignoramos si el modelo estándar o la supersimetría se siguen de la teoría de cuerdas, o si el universo que se deriva de ella contiene materia oscura. Desde este punto de vista, no sabemos casi nada.

¿Hay observaciones o experimentos con potencial para cambiar esa situación?
Algo realmente útil sería observar la desintegración de un protón. Al formular una teoría de gravedad cuántica, es necesario introducir partículas muy masivas. Y los intercambios de tales partículas podrían provocar que el protón fuese inestable y se desintegrase en escalas de tiempo muy grandes. Por desgracia, carecemos de pruebas de que eso ocurra, aunque algunos investigadores las están buscando.

¿Es inteligente buscar extensiones del modelo estándar usando las estrategias habituales? En el pasado, algunos físicos han debatido con intensidad sobre la necesidad de usar herramientas matemáticas distintas de la teoría cuántica de campos.
Sería conveniente que quienes defienden esa idea indicaran algún fenómeno que la teoría de campos fuera incapaz de describir. Decir que deberíamos hacer algo diferente sin indicar qué no me parece de gran ayuda. No obstante, es cierto que, además de todos los aspectos positivos que he mencionado, el modelo estándar presenta algunos puntos oscuros. Por ejemplo, en lo que respecta al mecanismo de Higgs, al valor de la masa de los quarks o al parámetro conocido como «ángulo de Cabibbo».

El modelo estándar no aporta ninguna explicación fundamental para estos parámetros. ¿Hay alguna solución a la vista?
No. Para buena parte de estos problemas carecemos de una explicación cualitativa elegante y, en muchos casos, ni siquiera disponemos de candidatos para dicha explicación. Y cuando no hay buenas ideas, no las hay, es así de simple. Puede ser que en estos momentos la física de partículas sea un campo difícil. Aunque, por otra parte, hay físicos jóvenes y motivados capaces de hacer frente a problemas complejos.

Siempre que esos físicos no se decanten por la materia condensada. Dicho campo ha vivido grandes progresos desde su artículo de 1991. Por ejemplo, los alones eran por aquel entonces un concepto extremadamente teórico. ¿Cómo ve la situación en la actualidad?
Desde un punto de vista teórico, ha quedado claro que los alones pueden existir. Sin embargo, todavía no disponemos de un experimento concluyente que demuestre sin ambigüedades sus exóticas propiedades. La teoría nos dice que los alones tienen algo así como «memoria»: un recuerdo de cómo se han movido unos con respecto a otros. Por tanto, los físicos experimentales deberían poder leer esa información en la función de onda. Algunos grupos afirman haberlo conseguido, aunque no todos se muestran convencidos.

¿Por qué resulta tan difícil investigar estas partículas?
Hacer estadística con estados cuánticos es complejo, ya que existen relaciones sutiles entre un gran número de objetos que interaccionan entre sí. Por otro lado, los efectos son minúsculos y frágiles. Con todo, estoy convencido de que veremos grandes progresos en los próximos años.

«No creo en la visión simplista de un creador que hace al ser humano a partir de barro. Si hay un creador, tiene que ser algo mucho más abstracto»

¿Qué aplicaciones podría tener este fenómeno?
Los alones podrían ser de ayuda en el desarrollo de ordenadores cuánticos. Tanto los electrones como los átomos pierden su comportamiento cuántico cuando entran en contacto con el medio circundante. Por eso, el principal desafío a la hora de construir un ordenador cuántico reside en aislarlo muy bien del entorno. Los sistemas cuánticos con alones serían mayores, más robustos y carecerían de ese problema.

Microsoft parece haber concentrado en los alones sus investigaciones sobre computación cuántica.
Sí, la compañía ha invertido enormes sumas de dinero y ha empleado a físicos de gran talento para ese proyecto. Se trata de algo muy importante para el campo.

En su artículo de 1991 escribía también sobre la superconductividad de altas temperaturas. Especulaba con la posibilidad de que los alones pudieran explicar la misteriosa dinámica de este fenómeno.
Por desgracia, esa idea no se ha confirmado. Desde una perspectiva teórica, seguimos sin entender qué sucede en el interior de un superconductor de alta temperatura.

Muchas ideas de la física conducen de un modo u otro a aplicaciones tecnológicas. ¿Qué espera en este sentido en los próximos años?

PARTÍCULAS CON «MEMORIA»

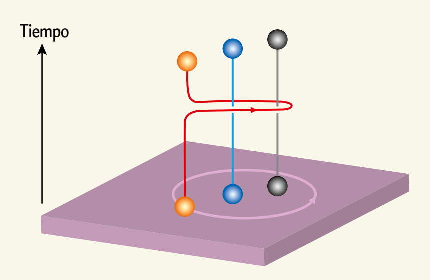
¿Qué son los alones?

En principio, los alones no deberían existir. En 1940, el célebre físico Wolfgang Pauli demostró que en la naturaleza solo podía haber dos tipos de partículas: fermiones y bosones. Hoy sabemos que los primeros incluyen todas las partículas elementales que forman la materia, como los electrones, los neutrinos o los quarks. En las unidades adecuadas, su espín (una magnitud que puede entenderse como el momento angular intrínseco de la partícula) toma siempre un valor semientero: 1/2, 3/2... Por su parte, los bosones comprenden aquellas partículas que, como los fotones y los gluones, transmiten las interacciones fundamentales. A diferencia de los fermiones, su espín solo puede tomar valores enteros: 0, 1, 2...

En 1988, sin embargo, el investigador del Instituto Politécnico de Zúrich Jürg Frölich se percató de que, en un mundo que solo tuviese dos dimensiones espaciales, dicha regla admitiría una excepción. En tal caso podrían existir «alones»: partículas cuyo espín no tendría por qué restringirse a valores enteros o semienteros, sino que podría adoptar cualquier valor. En inglés, Frank Wilczek las bautizó como *anyons,* una palabra formada a partir de la voz *any*, «cualquiera», en referencia al valor arbitrario de su espín. La traducción empleada aquí, *alones*, se basa en el prefijo de origen griego *alo-*, que significa «otro» o «distinto».

Otra particularidad de los alones es que pueden exhibir una especie de «memoria». Cuando dos de ellos intercambian sus posiciones respectivas, la función de onda asociada «recuerda» que dicho intercambio tuvo lugar. Hace tiempo que los físicos intentan usar esta exótica propiedad para construir una nueva clase de ordenadores cuánticos, los llamados ordenadores cuánticos topológicos.

No obstante, para lograrlo primero habría que demostrar la existencia de los alones. Aunque nuestro universo no tiene dos dimensiones espaciales, sino tres, Wilczek y otros investigadores han indicado cómo podrían observarse: en la superficie de ciertos sólidos o en materiales bidimensionales, y en forma de «cuasipartículas», estados colectivos de los electrones del material. Aunque existen algunos indicios experimentales de su existencia, hoy por hoy los físicos carecen de pruebas concluyentes al respecto.



MEMORIA CUÁNTICA: Los alones podrían existir como estados colectivos de electrones en materiales bidimensionales (*lila*). Si un alón (*naranja*) describe una circunferencia alrededor de otros (*azul y negro*), la configuración final (*arriba*) será idéntica a la inicial (*abajo*). Sin embargo, la función de onda conservará información sobre la manera en que sus trayectorias se han «trenzado» entre sí.

El año pasado escribí un artículo sobre el futuro de la inteligencia. En él analizaba una particularidad del cerebro humano que lo hace muy poderoso: el hecho de que comienza con unas pocas células que se multiplican y que establecen un gran número de conexiones. Su crecimiento es exponencial. Aunque en ingeniería no disponemos de una tecnología con tales características, esa situación podría cambiar de algún modo. Eso permitiría desarrollar máquinas que se reprodujesen e interactuasen entre ellas.

¿Podría la interacción nuclear fuerte, por cuyo estudio obtuvo usted el premio Nobel, constituir la base de algún tipo de tecnología futura?

Resulta difícil de imaginar, aunque desde un punto de vista teórico es concebible. La superficie de una estrella de neutrones se halla compuesta por una mezcla de neutrones y protones sometidos a una gravedad extrema. Ello podría dar lugar a una química muy particular y, en último término, a nuevos patrones y mecanismos de procesamiento de información. Hay un libro de ciencia ficción muy interesante, *Huevo del dragón*, de Robert Forward, que fantasea con ese escenario.

En él se habla de una forma de vida inteligente que se desarrolla en una estrella de neutrones, a pesar de la descomunal intensidad de la gravedad.

Si existiera tal forma de vida, su metabolismo sería vertiginoso comparado con el nuestro, ya que la interacción nuclear fuerte es mucho más rápida que la química que conocemos. Y por la misma razón, los ordenadores construidos sobre esa base serían mucho más potentes que los actuales. El problema reside en que, para los humanos de hoy, llegar a una estrella de neutrones y construir algo allí es sencillamente imposible. Así visto, no cabe esperar que la interacción fuerte vaya a tener aplicaciones tecnológicas en un futuro previsible. Con todo, su belleza siempre seguirá fascinándonos. IyC

Manon Bischoff *y* ***Robert Gast*** *son físicos y redactores de* Spektrum der Wissenschaft, *la edición alemana de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. David Gross y Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 30, págs. 1343-1346, junio de 1973.
Problem of strong *P* and *T* invariance in the presence of instantons. Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 40, págs. 279-282, enero de 1978.
Fractional statistics and anyon superconductivity. Frank Wilczek. World Scientific, 1990.
El mundo como obra de arte. Frank Wilczek. Crítica, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Alones. Frank Wilczek en *IyC* julio de 1991.
Computación con nudos cuánticos. Graham P. Collins en *IyC*, junio de 2006.
Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.
Materia oscura axiónica. Leslie Rosenberg en *IyC*, marzo de 2018.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

El balanceo de las hojas al caer

La manera en que fluye el aire alrededor de las hojas que caen de un árbol da lugar a varios patrones de movimiento recurrentes

A muchas personas les afecta emocionalmente la caída de las hojas en otoño, un espectáculo natural del que los poetas llevan hablando desde tiempos inmemoriales. Así, Edmond Rostand hizo que su Cyrano de Bergerac exclamara:

¡Qué bien caen! Cómo saben revestir
de una belleza postrera ese trayecto
tan corto de la rama a la tierra; y
a pesar de su espanto por pudrirse
en el suelo, ¡intentan que su caída
tenga la gracia de un vuelo!

1. CUANDO CAEN DEL ÁRBOL, las hojas descienden a menudo de una de tres formas posibles: en posición horizontal (*izquierda*), oscilante (*centro*) o rotatoria con desplazamiento lateral (*derecha*).

Este pasaje formula de manera poética la interesante observación —desde el punto de vista de la física— de que las hojas no solo se bambolean al azar mientras caen, sino que, a menudo, muestran movimientos regulares.

Si estudiamos el fenómeno con mayor detenimiento, podremos reconocer ciertas formas básicas que se distinguen especialmente bien cuando el viento está en calma. Aparte de la caída irregular y caótica, a menudo podemos encontrar tres patrones concretos.

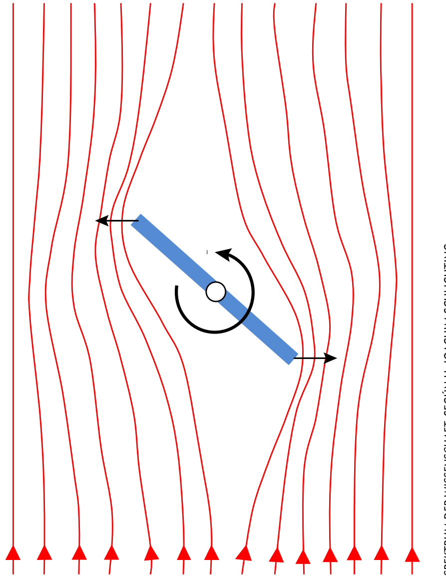
El primero es la caída en posición horizontal, donde la hoja flota plana en el aire y solo se balancea ligeramente en torno a dicha posición. En segundo lugar tenemos la caída oscilante, en la que las hojas se mecen alternativamente a un lado y a otro de manera bastante regular. Y por último podremos observar la caída rotatoria, caracterizada por un movimiento en el que la hoja gira sobre sí misma y experimenta una notable desviación lateral (*véase la figura 1*).

Flujos de aire

Para esbozar una explicación, podemos simplificar e imaginarnos que la gravedad actúa sobre el centro de masas de la hoja. La velocidad de esta aumentaría de modo constante debido a la aceleración de la gravedad si no fuera por la fuerza de resistencia del aire, que aumenta con el cuadrado de la velocidad y es proporcional al área de la sección transversal expuesta al aire incidente.

El proceso puede observarse con una serie de experimentos sencillos. Para ello conviene reducir el número de factores que intervienen y variarlos de manera controlada. En nuestro caso, la manera más sencilla de conseguirlo es usando naipes o notas autoadhesivas. Estas últimas se encuentran disponibles en distintos tamaños y podemos modificar fácilmente su masa cambiando la cantidad de notas pegadas. Adheridas a los naipes también permiten variar la masa de estos, y si los liberamos con diferentes ángulos iniciales, con algo de habilidad podremos reproducir las tres formas básicas de caída mencionadas.

En la situación más simple, la caída horizontal, la hoja se suelta apaisada, cae al suelo oscilando ligeramente y aterriza prácticamente bajo el punto de partida (con una cierta dispersión). El tramo de aceleración es muy corto porque el flujo de aire se opone a una sección transversal máxima. Por tanto, la fuerza de resistencia del aire compensa la de la gravedad al poco de comenzar la caída, y la hoja desciende a una velocidad constante. En



2. CUANDO LA HOJA QUE CAE pierde su posición horizontal, las líneas de corriente (*rojo*) que se encuentran a su alrededor se comprimen ligeramente. Eso genera una zona de menor presión en los extremos de la hoja y, como resultado, se produce un momento de giro (*flechas negras*) que la lleva de nuevo a una posición horizontal.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN H. JOACHIM SCHLICHTING



LA ELEGANCIA que a menudo muestran las hojas cuando caen de un árbol no es casual. Dependiendo de las condiciones iniciales, su movimiento puede clasificarse en tres tipos básicos.

GETTY IMAGES/VIT-PLUS/ISTOCK

realidad, dejar caer un naipe a pulso en una posición completamente horizontal es casi imposible. Además, el aire nunca está calmado del todo, lo que genera fluctuaciones que, en ocasiones, crecen hasta dar lugar a una caída oscilante, nuestro segundo escenario.

Para describir este caso podemos emplear un modelo muy simplificado en el que el flujo del aire puede representarse mediante líneas de corriente (*véase la figura 2*). Si dejamos caer la hoja inclinada, esta «resbalará» lateralmente sobre el aire. Este, a su vez, habrá de esquivarla, por lo que se acelerará en los extremos de la hoja. De manera gráfica, las líneas de corriente se comprimen y el aire que hay entre ellas se separa, lo que genera una zona de presión reducida.

Las fuerzas correspondientes actúan sobre ambos extremos de la hoja y, como resultado, producen un momento de giro, el cual desaparecerá en cuanto la hoja vuelva a la posición horizontal. Sin embargo, por inercia, esta continuará girando un poco más, por lo que acto seguido experimentará un momento de giro opuesto. Cuando eso ocurre el sentido de la rotación se invierte y el proceso se repite. Como resultado, la hoja se balancea de un lado a otro.

En el tercer caso, la hoja comienza a caer casi vertical. El área de la sección transversal expuesta al flujo de aire es mínima, lo que provoca que la resistencia del aire también lo sea y la hoja experimente una aceleración máxima. Pero la resistencia del aire aumenta muy rápidamente con la velocidad, por lo que cualquier pequeña desviación de la vertical —con el consiguiente aumento de la superficie de la sección transversal— producirá de súbito una fuerza mucho mayor.

Por el mismo mecanismo que en la caída oblicua, aparece un momento de giro efectivo. No obstante, en este caso la inercia es tan grande que la hoja no solo rota más allá de la posición horizontal, sino que continúa y sobrepasa también la vertical. Como consecuencia, regresa a una situación similar a la de partida: la hoja gira una y otra vez y, al mismo tiempo, se desplaza lateralmente.

Regularidad natural

A pesar de la regularidad de los movimientos que acabamos de describir, las trayectorias son muy sensibles a las interferencias, incluso cuando usamos cartones rectangulares. Por eso resulta aún más sorprendente que las hojas de los árboles, con formas mucho más intrincadas, exhiban, al menos por momentos, los tres patrones descritos. ¿A qué se debe?

Por un lado, la forma concreta de la hoja podría resultar idónea para cierto tipo de movimiento. Pero, sobre todo, en otoño observamos una gran cantidad de «experimentos» simultáneos con todo tipo de condiciones iniciales. Por tanto, la probabilidad de que seamos testigos de una configuración favorable es mayor que cuando realizamos a mano un número más limitado de intentos.

Las trayectorias de las partes que se desprenden de las plantas no siempre son aleatorias. Las semillas de arce, por ejemplo, describen un movimiento de rotación típico con independencia del ángulo de partida. Como resultado, aguantan mucho tiempo en el aire y este las arrastra lejos. Por el contrario, las hojas suelen permanecer junto a su árbol: protegen sus raíces de las heladas durante el invierno y acaban convirtiéndose en humus que alimenta el crecimiento de nuevas hojas... hasta el otoño siguiente.

PARA SABER MÁS

Chaotic dynamics of falling disks. Stuart B. Field et al. en *Nature*, vol. 388, págs. 252-254, julio de 1997.

EN NUESTRO ARCHIVO

El vuelo de la sámara: semilla alada de arces, fresnos y otros árboles. Jearl Walker en *IyC*, diciembre de 1981.

Sámaras como hélices. Satoshi Kuribayashi en *IyC*, octubre de 1993.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

El Nobel de los Curie

De las dificultades de experimentar con muestras radiactivas a las de obtener el reconocimiento científico de las mujeres

José Manuel Sánchez Ron

Cuando el siglo xix daba sus últimos coletazos, se extendió entre los físicos la idea de que con la dinámica newtoniana y la electrodinámica de Maxwell quedaban completas las bases teóricas para describir la naturaleza. Así, se adjudican al físico estadounidense Albert Abraham Michelson —que fue, en 1907, el primer estadounidense en recibir el Nobel de física— unas frases que aparentemente pronunció el 2 de julio de 1894: «Parece probable que la mayoría de los grandes principios básicos hayan sido ya firmemente establecidos y que haya que buscar los futuros avances sobre todo mediante la aplicación rigurosa de estos principios [...] Las futuras verdades de la ciencia física se deberán buscar en la sexta cifra de los decimales». Que predecir el futuro es arriesgado quedaba claro cuando, en 1895, Wilhelm Röntgen descubría los rayos X y el año siguiente Henri Becquerel la radiactividad, dos fenómenos que nadie sabía cómo encajar en el aparentemente firme, sólido y cerrado edificio de la física conocida.

A Becquerel (1852-1908), es cierto, le corresponde el mérito del descubrimiento de la radiactividad, pero no fue él quien hizo más por hacer del nuevo fenómeno un activo campo de investigación en física, sino una joven polaca, Marii Sklodowska (1867-1934), que en noviembre de 1891 se había trasladado a París para estudiar en la Sorbona. Allí obtuvo, en 1893, la licenciatura en ciencias, siendo la primera de su promoción, y al año siguiente, la licenciatura en matemáticas. Aquel mismo año conoció a Pierre Curie (1859-1906), quien entonces ocupaba el modesto puesto de preparador de física en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales de París. Se trataba de un centro educativo de nivel no demasiado elevado, lejos de las prestigiosas *Écoles* y, por supuesto, de la Sorbona. El 26 de julio de 1895, Marii contrajo matrimonio civil con Pierre. Se convirtió así en Marie Curie, el nombre por el que sería conocida universalmente.

La búsqueda de muestras de pechblenda

Casada y licenciada, Marie decidió doctorarse. Buscando un tema de tesis, en 1897 se fijó en el descubrimiento de la radiactividad, la capacidad del uranio de emitir radiaciones de forma aparentemente inagotable. Seguramente favoreció su interés la proximidad de su descubridor: Becquerel era catedrático del Museo de Historia Natural de París. «Mi atención», recordó Marie Curie en su autobiografía, «había sido atraída por los interesantes experimentos de Henri Becquerel con las sales del raro metal uranio [...] Mi marido y yo estábamos muy excitados por este nuevo fenómeno, y decidí emprender un estudio especial sobre él. Me parecía que lo primero que había que hacer era medir el fenómeno con precisión. Para ello decidí utilizar la propiedad de los rayos que les permitían descargar un electroscopio. Sin embargo, en lugar del electroscopio habitual, utilicé un aparato más perfecto». Se refería al electroscopio de cuarzo piezoeléctrico, un instrumento basado en el fenómeno de la piezoelectricidad (electricidad producida debido a presiones) e inventado en 1891 por Pierre y su hermano Jacques.

El primer producto de las investigaciones de Marie fue un artículo («Rayos emitidos por los compuestos de uranio y de torio») que el 12 de abril de 1898 Gabriel Lippman presentó a la Academia de Ciencias para que se publicase en *Comptes Rendus*. En una nota a pie de página, Marie explicaba que «el uranio empleado en este estudio ha sido proporcionado por el Sr. Moissan. Las sales y óxidos, productos puros, provienen del laboratorio del Sr. Étard en la Escuela de Física y Química. El Sr. Lacroix ha tenido la gentileza de suministrarme algunas muestras de minerales de procedencia conocida, de la colección del Museo. Algunos óxidos raros y puros me han sido dados por el Sr. Demarçay. Agradezco a estos señores su gentileza».

Esa nota muestra la imperiosa necesidad de materiales que contuviesen compuestos de uranio. Un resultado inesperado de esos primeros experimentos fue que la pechblenda (una variedad de la uraninita, que es rica en uranio) y la chalcolita (fosfato de cobre y uranio) eran mucho más activas que el propio uranio o el torio, que también exhibía radiactividad. Ello llevó a Marie a pensar que los minerales con que trabajaba podrían contener un elemento mucho más radiactivo. Tenía, por consiguiente, que intentar aislar el o los elementos que creía haber detectado indirectamente. Pero la tarea que se vislumbraba parecía demasiado exigente para ella sola, así que solicitó la ayuda de su marido, un maestro consumado en el manejo del electrómetro piezoeléctrico



COLECCIÓN WELLCOME

MARIE CURIE (1867 - 1934).

(como al principio no conocían ninguna de las propiedades de la sustancia que buscaban, únicamente que emitía radiación, se tuvieron que basar sobre todo en la ionización, y subsiguiente corriente eléctrica, que producía esa radiación, tarea para la que era imprescindible el electrómetro). Pierre aceptó interrumpir los estudios que estaba realizando con cristales.

Fue Pierre quien se ocupó de intentar obtener suficientes muestras de minerales para proceder con la investigación, pues las que Marie había utilizado no bastaban y no había más en París. Después de intentarlo en Inglaterra e incluso en el Servicio Geológico de Estados Unidos, entró en contacto con las minas austríacas de Sankt Joachimsthal. Era entonces la única mina europea que explotaba la pechblenda, que era tratada para, con el uranio que contenía, producir colores (el verde, principalmente) que se utilizaban en las industrias del vidrio y la cerámica. Lo que los Curie deseaban era obtener residuos ya no utilizables para esas industrias, pero que aún deberían contener productos radiactivos, incluidos los procedentes de la desintegración del uranio. Sin embargo, no fue fácil conseguir la colaboración de Sankt Joachimsthal, como se comprueba en las cartas que, desde la administración de la mina, Frank Babanek, consejero imperial y real de Minas, envió a Pierre en respuesta a una anterior de este, la primera datada el 4 de octubre de 1898:

Querido señor:

Disponiendo de su preciosa carta del 29 de septiembre, tengo el honor de adjuntarle una muestra de residuos del tratamiento del mineral de uranio de 5 kg de peso para que investigue si contienen metales desconocidos, pero precisando que este residuo procede de la uraninita que contiene en ocasiones pequeñas cantidades de sulfuro de plomo.

Le enviamos esta muestra gratuitamente y nos agradaría si esto le sirviera y nos permitimos pedirle, lo más educadamente posible, si quisieran hacernos partícipes, a su conveniencia, de los resultados. Si tienen éxito encontrando en esta muestra el metal desconocido y si desean repetir el experimento con una cantidad más grande de residuos, podríamos, con la autoridad de nuestro superior, suministrarles una muestra parecida a un precio conveniente.

Pierre respondió el 16 de octubre, pero no se conoce su contestación. Sí la de Babanek del 20 de octubre:

Podríamos enviarle más tarde una cantidad mayor de residuos, pero no se puede confirmar provisionalmente el precio. No lo podríamos hacer más que después de conocer el valor de los metales raros contenidos en los residuos, lo que tendrá un efecto decisivo en el precio de nuestro producto.

No podemos darle información en lo que concierne a la producción del color, puesto que esto es un secreto profesional y lamentamos no poder enviarle los productos intermediarios para el tratamiento de los residuos. Sin embargo, si nos precisa el proceso químico de la investigación sobre su metal, podríamos examinar aquí algunos residuos y hacerle saber, con la autorización de nuestro superior, el resultado.

La muestra inicial de 5 kilogramos que recibieron de la mina austríaca sirvió a los Curie para detectar un nuevo elemento radiactivo, al que denominaron polonio, en homenaje a la patria de Marie. Pero para proseguir su investigación necesitaban una cantidad mayor de residuos. Para tratar de superar las dificultades que estaban encontrando en su comunicación directa con la administración de la mina, se dirigieron al embajador de Francia en Viena. La carta, firmada por Pierre y Marie Curie y fechada el 1 de noviembre de 1898, decía lo siguiente:

*El Sr. y la Sra. Curie piensan haber descubierto en el mineral de uranio un nuevo metal, que han llamado polonio (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 18 de julio de 1898). Piensan que este metal debería encontrarse en los residuos del tratamiento del mineral de uranio. En efecto, han descubierto que un residuo de 5 kg de peso que han recibido como muestra de la administración de Minas de Joachimsthal contiene polonio en mayor cantidad que el mineral original.*

El Sr. y la Sra. Curie reconocieron la presencia del polonio por un medio físico y buscan establecer el método químico para extraer este nuevo metal y purificarlo. Para este fin, desearían recibir una cantidad más grande de muestras. Necesitan entre 30 y 100 kg. También desearían recibir muestras de otros residuos de fabricación y de productos de sublimación.

Las administraciones de Minas y de la Industria de Joachimsthal piensan que no pueden cumplir con esta petición. El Sr. y la Sra. Curie solicitan una mediación favorable en este asunto. El propósito de sus investigaciones es exclusivamente científico y la fábrica de uranio de Joachimsthal se beneficiará de estas investigaciones vendiendo o explotando estos residuos actualmente sin valor. El Sr. y la Sra. Curie solicitan, por tanto, que la administración de Joachimsthal se preste a facilitar sus investigaciones.

Leyendo el artículo al que se referían («Sobre una nueva sustancia radiactiva contenida en la pechblenda»), queda claro que, aunque se habían atrevido a bautizar el nuevo elemento, no estaban completamente seguros de su existencia (los análisis espectrográficos realizados por Eugène Demarçay no permitían identificar el elemento). Por eso necesitaban la cantidad que solicitaban a Sankt Joachimsthal. Finalmente la recibieron, pero no gracias a la intervención del embajador francés, sino a la del geólogo austríaco Eduard Suess, profesor de la Universidad de Viena y, de 1898 a 1911, presidente de la Academia Austríaca de Ciencias. A este le había solicitado ayuda el ingeniero de minas Auguste Michel-Lévy, miembro de la Academia de Ciencias, desde 1887 director del Mapa Geológico de Francia y en 1898 inspector general de minas. El 10 de noviembre, Lévy escribía a Suess:

Mi querido maestro:

Dos sabios franceses, el Sr. y la Sra. Curie (el Sr. Curie ya ha producido trabajos muy apreciados en mineralogía y en física), tienen necesidad de una cierta cantidad de residuos de pechblenda para continuar sus trabajos puramente científicos sobre un

nuevo metal, el polonio, cuyas propiedades radio-ópticas son muy sorprendentes.

Después de haber obtenido fácilmente del Sr. Consejero Imperial y Real de Minas Babanek de Joachimsthal 5 kg de estos residuos, han recibido una segunda carta equivalente a una negación para el futuro.

Teniendo en cuenta el interés científico de las investigaciones del Sr. y la Sra. Curie, investigaciones que incluso ulteriormente podrían conducir a la utilización industrial de desechos que actualmente no se aprovechan, me atrevo a pedirle si no podría obtener que el Ministerio de Minas apoyase a estos sabios.

Cuatro días después, Suess escribía a Lévy: «En camino 100 kilos gratis». Inmediatamente Lévy se la reenviaba a Pierre Curie, anotando:

Querido señor:

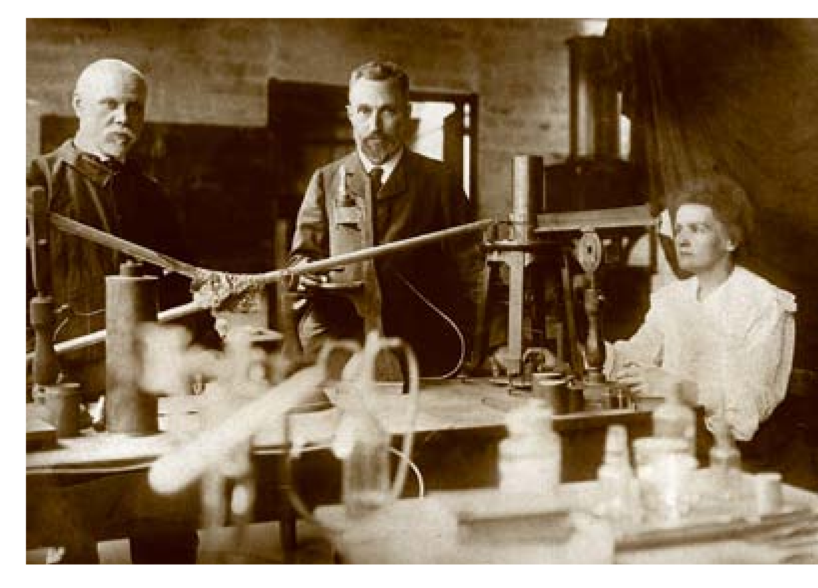
Vea que su nuevo metal está en camino hacia París. Convendría que dirigiera su agradecimiento al Sr. Suess.

A partir del análisis de los 100 kilogramos enviados desde Austria, tarea para la que necesitaron la ayuda de Gustave Bémont (1857-1932), el químico que entonces dirigía los trabajos de química mineralógica en la Escuela Municipal de Física y Química Industriales, encontraron un nuevo elemento radiactivo que poseía una actividad 900 veces la del uranio (la del polonio lo era 400 veces). Le pusieron el nombre de «radio». El 26 de diciembre anunciaron el descubrimiento presentando a la Academia un artículo (firmado por los Curie y Bémont) titulado «Sobre una nueva sustancia fuertemente radiactiva, contenida en la pechblenda». Al final del mismo, añadieron la siguiente nota: «Que nos sea permitido agradecer aquí al Sr. Suess, correspondiente del Instituto [de Francia], profesor en la Universidad de Viena. Gracias a su bienvenida intervención, hemos obtenido del Gobierno austríaco, a título gratuito, 100 kg de residuos del tratamiento de la pechblenda en Joachimsthal, que no contiene ya uranio, pero sí polonio y radio. Este envío facilitará mucho nuestras investigaciones».

Quedaba así completado el trabajo que constituyó el mayor éxito en la carrera científica de los Curie. Un resultado que, además, consolidó el interés que poseía el nuevo fenómeno físico descubierto por Becquerel.

El premio Nobel

Una forma de medir el reconocimiento que tiene un hallazgo científico es a través del premio Nobel. En 1974, la Fundación Nobel relajó la exigencia de sus estatutos de que las deliberaciones relativas a la concesión de los premios permaneciesen secretas; así, autorizó el acceso a sus archivos para propósitos de investigación histórica, con la restricción de que los documentos en cuestión tuvieran al menos medio siglo de antigüedad. Gracias a esta apertura, es posible conocer las propuestas que se recibieron y la identidad de los proponentes. (En cualquier caso, las propuestas no son vinculantes; las elecciones recaen en última instancia en las academias suecas.)



MARIE Y PIERRE CURIE, junto a Henri Becquerel, 1898.

Sabemos que el matemático sueco Gösta Mittag-Leffler, figura ilustre en la comunidad matemática internacional de la época, desempeñó un papel destacado en que Marie Curie fuese premiada. Si solo se hubiesen tenido en cuenta las propuestas recibidas, difícilmente habría sido elegida, más aún habida cuenta de una carta de tres miembros de la Academia de Ciencias, Henri Poincaré, Eleuthère Mascart, Gaston Darboux (los tres miembros extranjeros de la Academia sueca), y Gabriel Lippmann, que había sido invitado aquel año a realizar propuestas junto a otros dieciséis académicos que no tenían facultad para presentar candidaturas, en la que proponían solo a Becquerel y Pierre Curie. Marie quedaba al margen de la propuesta francesa.

La carta en cuestión es larga, pero contenía pasajes como los siguientes:

Uno de los descubrimientos más importantes que se han hecho en física en los últimos años es el de la radiactividad de la materia. Se trata, en efecto, de un hecho absolutamente nuevo y que toca a la vez a las propiedades más íntimas de la materia y del éter. El que conserve todavía tal misterio no constituye sino una razón más para esperar que producirá aún descubrimientos interesantes e inesperados.

Este hallazgo se debe a los Sres. Becquerel y Curie.

Después del descubrimiento de los rayos X, el Sr. Becquerel tuvo la idea de buscar si los cuerpos fosforescentes emitían radiaciones análogas [...]

En 1898, el Sr. Curie se ocupó a su vez de esta cuestión y estudió diferentes minerales de uranio y de torio, algunos de los cuales aparecieron dotados de una radiactividad particularmente intensa.

Y continuaban de manera parecida, siempre sin nombrar a Marie. Solo Charles Bouchard propuso la candidatura conjunta de Becquerel y los dos Curie.

Sin embargo, Mittag-Leffler, uno de los pocos científicos de entonces que estimaban y animaban el trabajo de mujeres —era amigo y protector de la matemática rusa Sofía Kovalevskaïa—, no veía ningún motivo para que Marie fuera excluida de los premiados. En consecuencia, informó, sin precisar los detalles (eran secretos) a Pierre de las iniciativas en curso. El 6 de agosto de 1903, este le respondió:

Ha sido usted muy amable al informarme que he sido mencionado para el premio Nobel. No sé si este ruido tiene mucha consistencia, pero en el caso de que fuese cierto que estoy siendo considerado seriamente, desearía mucho que se me considerase solidario con la Sra. Curie en nuestras investigaciones sobre los cuerpos radiactivos. Es, en efecto, su primer trabajo el que ha determinado el descubrimiento de nuevos elementos y su parte es muy importante en este descubrimiento (también ha determinado el peso atómico del radio). Creo que el que estuviésemos separados en esta circunstancia sorprendería a mucha gente [...] He enviado a Suecia la tesis de la Sra. Curie y pienso que ellos mismos verán que su parte es tan grande como la mía en este trabajo.

Por otra parte, el 8 de septiembre, Mittag-Leffler escribía a Poincaré:

Mi querido amigo:

¿Querría decirme sinceramente y de manera absolutamente confidencial su opinión sobre la cuestión siguiente? ¿Sería más justo otorgar el premio Nobel de física al Sr. y Sra. Curie solos, o repartir el premio entre Becquerel por un lado y los Curie por otro? ¿Puede indicarme al mismo tiempo las razones de su opinión?

En su respuesta, que no era coherente con la que había firmado junto a Mascart, Darboux y Lippmann, Poincaré decía:

Yo creo que lo más justo sería repartir el premio entre Becquerel y los Curie; porque si los Curie son más finos y han avanzado más, Becquerel ha sido el iniciador.

Finalmente, el premio Nobel de física de 1903 fue otorgado a los tres, la mitad a Becquerel, y la otra a Marie y Pierre Curie.

En 1901, el primer año en que se otorgaron los premios, ni Pierre ni Marie recibieron ninguna nominación. Sí Becquerel (lo propuso Marcelin Berthelot). El galardonado fue Röntgen, que fue propuesto por 16 personas. En 1902, Becquerel recibió 3 cartas de apoyo, el mismo número que Pierre Curie, mientras que Marie solo 2 (de Darboux y Warburg). Fueron galardonados Hendrik Lorentz (6 nominaciones) y Pieter Zeeman (1). En 1903, cuando la radiactividad fue premiada, Becquerel recibió 6 propuestas (Berthelot, Bouchard, Darboux, Lippmann, Mascart y Poincaré); Pierre Curie, 5 (Darboux, Lippmann, Mascart, Poincaré y Bouchard), y Marie, 1 (Bouchard). A pesar de las diferencias en número de propuestas, los tres recibieron el premio: Becquerel «en reconocimiento a los extraordinarios servicios que ha prestado con su descubrimiento de la radiactividad espontánea», y Pierre y Marie Curie, «en reconocimiento a los extraordinarios servicios que han prestado con sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de radiación descubiertos por el profesor Becquerel».

Con el premio llegó la fama. El 31 de enero de 1904, el presidente de la República, Émile Loubet, y el ministro de Instrucción Pública, Joseph Chaumié, visitaban el laboratorio de los Curie y prometían nuevos locales. El rector de la Academia, Louis Liard, pedía al Parlamento que crease una cátedra en la Sorbona para Pierre Curie. El 1 de octubre del mismo año fue nombrado catedrático de la Facultad de Ciencias de la Sorbona. La cátedra que recibió se denominó «Física general y radiactividad». En octubre de 1905, Pierre era elegido para ocupar un lugar en la Academia de Ciencias, la misma institución que en 1902 había preferido elegir a Emile Amagat, y no a Pierre, que también era candidato. En cuanto a Marie, los honores académicos que recibió fueron mucho más modestos: el 1 de noviembre de 1904 fue nombrada directora de trabajos en el laboratorio de su marido en la Facultad de Ciencias (hasta entonces, y desde el 26 de octubre de 1900, ocupaba el puesto de encargada de conferencias de física de primer y segundo curso en la Escuela Normal Superior de enseñanza secundaria para mujeres de Sèvres). No fue, sin embargo, hasta finales de 1905 cuando el laboratorio de los Curie se transfirió de la Escuela de Física y Química a un anexo de la Facultad de Ciencias.

Ni Pierre ni Marie asistieron a la ceremonia de concesión de los premios en Estocolmo (los representó el embajador de Francia). En una carta que enviaron el 19 de noviembre a Christer Aurivillius, secretario perpetuo de la Real Academia de Ciencias sueca, se justificaron argumentando que Pierre tenía que cumplir con sus deberes docentes y que Marie «ha estado enferma este verano y todavía no se ha recuperado del todo» (por entonces el viaje de París a la capital sueca duraba, en tren, cuarenta y ocho horas en cada sentido). Sin embargo, era (y sigue siéndolo) preceptivo que los galardonados ofreciesen un discurso en Estocolmo. Pierre cumplió con semejante obligación el 6 de junio de 1905. Viajó con Marie, quien no pronunció ninguna conferencia.

PARA SABER MÁS

Oeuvres de Pierre Curie. Gauthier-Villars, París, 1908.
Oeuvres de Marie Sklodowska Curie. Dirigido por Irène Joliot-Curie. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Varsovia, 1954.
The Nobel population, 1901-1937: A census of the nominators and nominees for the prizes in physics and chemistry. Elisabeth Crawford, J. L. Heilbron y Rebecca Ullrich. Oficina de la Historia de la Ciencia y la Tecnología, Universidad de California en Berkeley, y Oficina para la Historia de la Ciencia, Universidad de Uppsala, 1987.
La correspondance entre Henri Poincaré et Gösta Mittag-Leffler. Dirigido por Philippe Nabonnand. Birkhäuser, Basilea, 1999.
Pierre Curie: Correspondances. Dirigido por Karin Blanc. Éditions Monelle Hayot, Saint-Rémy-en-l'Eau, 2009.
Escritos biográficos. Marie Curie. Edicions UAB, Bellaterra, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Curie confidencial. Xavier Roqué en *IyC*, febrero de 2011.
Las mujeres de la tabla periódica. Brigitte van Tiggelen y Annette Lykkness en *IyC*, agosto de 2019.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.



Las constantes universales del caos

Una intrigante propiedad que aparece una y otra vez en todo tipo de sistemas dinámicos

Tomemos una calculadora e introduzcamos un número entre 0 y 1 elegido al azar. ¿Qué ocurre si apretamos reiteradamente la tecla de elevar al cuadrado? A menos que hayamos comenzado con el número 1, acabaremos siempre en 0, con independencia del valor inicial que hayamos escogido.

Este simple ejercicio nos proporciona un ejemplo de sistema dinámico discreto. En este caso, se trata de uno determinado por la función iterada

$$x_{n+1} = f(x_n) = x_n^2 \,,$$

donde el «tiempo» n es discreto y x_n toma valores en el intervalo $[0,1]$. Partiendo de una condición inicial dada, x_0, esta relación generará una secuencia x_0, x_1, x_2..., también llamada «órbita» o «trayectoria». Si comenzamos con una condición inicial mayor que 0 y menor que 1, la órbita correspondiente se dirigirá rauda al 0. Decimos que el 0 es un punto fijo de nuestro sistema, ya que al introducirlo en la función no varía:

$$f(0) = 0 \,.$$

¿Existe algún otro punto fijo en el intervalo $[0,1]$? Para encontrarlo, basta con resolver la ecuación

$$f(x) = x^2 = x \,,$$

cuyas únicas soluciones son 0 y 1. Vemos por tanto que 1 es también un punto fijo. Sin embargo, se trata de uno muy distinto del anterior: mientras que el 0 es un punto fijo atractor, o estable (la aplicación reiterada de la función f hace que la órbita se acerque más y más a él), el 1 es repulsor, o inestable. Esto último quiere decir que solo lo alcanzaremos si lo tomamos como condición inicial.

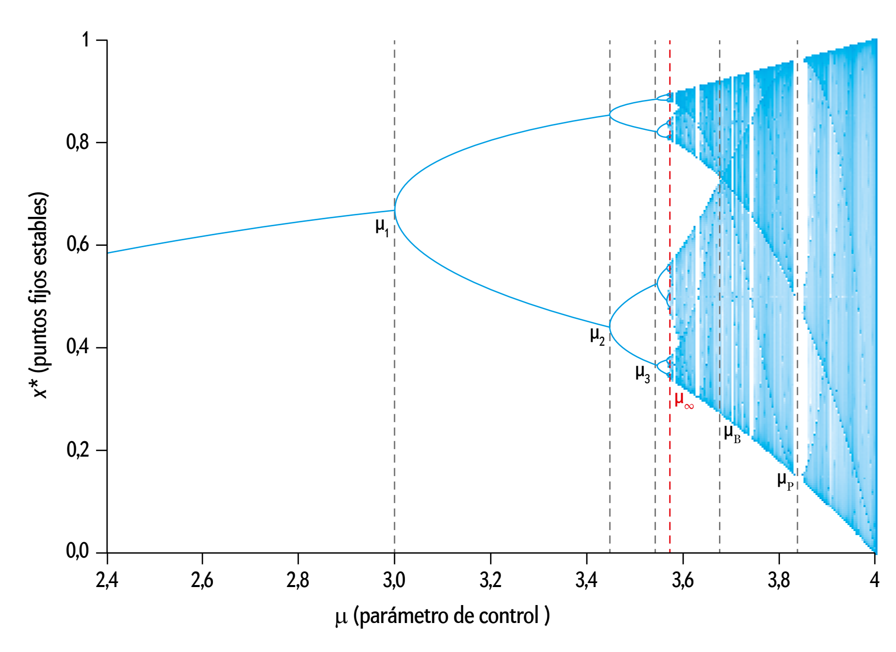
En general, dada una función $f(x)$ y un punto fijo x^*, podemos determinar su estabilidad sumando a x^* una pequeña cantidad, ε, y examinando qué ocurre al volver a introducirlo en la función. Si la perturbación se reabsorbe y nuestro sistema regresa hacia x^*, nos encontraremos ante un punto fijo estable. En caso contrario, se tratará de uno inestable.

Todo esto puede analizarse muy fácilmente usando el desarrollo de Taylor a primer orden de $f(x)$ alrededor del punto fijo:

$$f(x^*+\varepsilon) \approx f(x^*) + f'(x^*)\varepsilon = x^* + f'(x^*)\varepsilon \,.$$

Esta ecuación nos dice que, cada vez que iteremos nuestro punto fijo perturbado, la perturbación ε se multiplicará por $f'(x^*)$, el valor de la derivada de f en el punto fijo. Por tanto, si el valor absoluto de dicha derivada, $|f'(x^*)|$, es menor que 1, la perturbación se acabará extinguiendo y nuestro punto fijo será estable. De lo contrario, nos encontraremos ante un punto fijo inestable.

En el caso de nuestra función cuadrática, la derivada es $f'(x) = 2x$, que vale 0 en



ESTE ÁRBOL DE FEIGENBAUM muestra los puntos fijos estables de la «función logística», $f(x) = \mu x(1 - x)$, en función del parámetro μ. En este diagrama, las rectas μ_1, μ_2 y μ_3 indican los tres primeros puntos de bifurcación Esa cascada de bifurcaciones, que en realidad es infinita, se sucede hasta el «punto de acumulación» μ_∞, donde comienzan las órbitas caóticas (*zonas sombreadas*). La región caótica del diagrama se ve salpicada por zonas claras en las que vuelven a aparecer órbitas periódicas, como la de período tres señalada a lo largo de la recta μ_P. Al recorrer el diagrama de derecha a izquierda, se observa que también las zonas caóticas comienzan a sufrir bifurcaciones a partir de la recta situada en μ_B. Dicha cascada de bifurcaciones inversas converge asimismo en μ_∞.

$x = 0$ y 2 en $x = 1$. Vemos que, en efecto, $x = 0$ es un punto fijo estable y que $x = 1$ corresponde a uno inestable. El hecho de que en $x = 0$ la primera derivada sea nula indica que la perturbación se absorbe más rápido de lo habitual (hay que considerar más términos en el desarrollo de Taylor). Cuando eso ocurre, decimos que el punto fijo es «superestable».

Bifurcaciones

No hay mucho más que rascar en nuestra función cuadrática. Sin embargo, su análisis resulta muy ilustrativo ya que se trata de un ejemplo básico del caso general

$$x_{n+1} = f(x_n) \,.$$

Este tipo de funciones surgen de manera natural al discretizar ecuaciones diferenciales y se han usado ampliamente para modelizar todo tipo de fenómenos naturales. Y, como veremos a continuación, resultan excelentes para explorar el fascinante mundo del caos.

Veamos cómo una pequeña modificación de nuestra función cuadrática puede generar una complejidad endemoniada. Consideremos la célebre «función logística»:

$$x_{n+1} = f_\mu(x_n) = \mu x_n(1 - x_n) \,,$$

donde, al igual que antes, x_n toma valores en el intervalo $[0,1]$. En realidad se trata de toda una familia de funciones: una para cada valor del «parámetro de control» μ. En lo que sigue, consideraremos que dicho parámetro toma valores en el intervalo $[0,4]$.

Para encontrar los puntos fijos y determinar su estabilidad procedemos como en el ejemplo anterior: resolvemos la ecuación $x = f(x)$ y calculamos el valor de la primera derivada en el punto fijo. En primer lugar, vemos que tenemos dos puntos fijos:

$$x^* = 0 \,,$$
$$x^* = 1 - 1/\mu \,.$$

El valor de la derivada en cada uno de ellos es, respectivamente,

$$f'(0) = \mu \,,$$
$$f'(1 - 1/\mu) = 2 - \mu \,.$$

Por tanto, el punto fijo $x^* = 0$ es estable cuando μ es menor que 1 e inestable en el resto de los casos. De hecho, si nuestra función tiene un parámetro de control menor que 1, todas las órbitas acabarán en 0 con independencia de la condición inicial. Ahora bien, ¿qué ocurre cuando μ toma valores mayores?

En tal caso, el punto fijo $x^* = 1 - 1/\mu$ toma el relevo. Del valor de la derivada vemos que este es estable siempre que μ se encuentre en el intervalo $(1,3)$. Más allá el punto fijo se torna inestable; sin embargo, aparece una interesante novedad: una órbita periódica formada por dos puntos x_1 y x_2 tales que

$$x_1 = f(x_2) \,,$$
$$x_2 = f(x_1) \,.$$

Decimos que en $\mu = 3$ se produce una «bifurcación por duplicación de período». En estas bifurcaciones un punto fijo pierde su estabilidad, pasando de atractor a repulsor, y aparecen dos nuevos puntos que forman un ciclo o atractor estable. Dado que el sistema oscila ahora entre dos valores, x_1 y x_2, decimos que se trata de una órbita de período dos. (Observemos que cada punto del par es un punto fijo estable de $f(f(x))$.)

Numéricamente podemos comprobar que, a medida que μ sigue aumentando, la amplitud de las oscilaciones periódicas (la distancia entre los puntos x_1 y x_2 que definen el ciclo) va creciendo hasta que, en cierto momento, se produce una nueva pérdida de estabilidad y aparece un nuevo ciclo, esta vez de período cuatro.

Si continuamos aumentando el valor de μ, comprobaremos que este proceso de bifurcación por duplicación de período se repite una y otra vez, lo que da lugar a órbitas sucesivas de períodos 8, 16, 32, 64... Este fenómeno se conoce como cascada de duplicación de períodos.

El árbol de Feigenbaum

¿Podemos visualizar toda esta información de manera compacta y sencilla? En efecto, podemos hacerlo gracias al árbol de Feigenbaum, el icono más famoso de los sistemas dinámicos (*véase la figura de la página anterior*).

El árbol de Feigenbaum representa el conjunto de puntos fijos estables en función del parámetro de control μ. Por ejemplo, si fijamos $\mu = 2{,}9$, veremos que la dinámica acaba convergiendo hacia el punto fijo $x^* = 1 - 1/2{,}9 = 0{,}655...$ Y, como comentábamos más arriba, esa situación continúa hasta llegar a $\mu_1 = 3$, donde se produce la primera bifurcación y aparecen dos nuevos puntos que conforman una órbita estable de período dos.

Esta pérdida de estabilidad y el nacimiento de dos puntos que forman un ciclo queda reflejada en el diagrama de Feigenbaum en forma de horquilla. La historia se repite una y otra vez a medida que aumentamos el valor de μ, con ramificaciones sucesivas en puntos que denotaremos μ_2, μ_3, etcétera.

Esta cascada de bifurcaciones prosigue hasta llegar a un «punto de acumulación»: $\mu_\infty = 3{,}5699456...$ En este momento hemos alcanzado el borde del caos. El período es ahora infinito y la órbita aperiódica recorre un conjunto no numerable de puntos: un atractor extraño consistente en un «polvo de Cantor» [*véase* «El conjunto de Cantor», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, agosto de 2019].

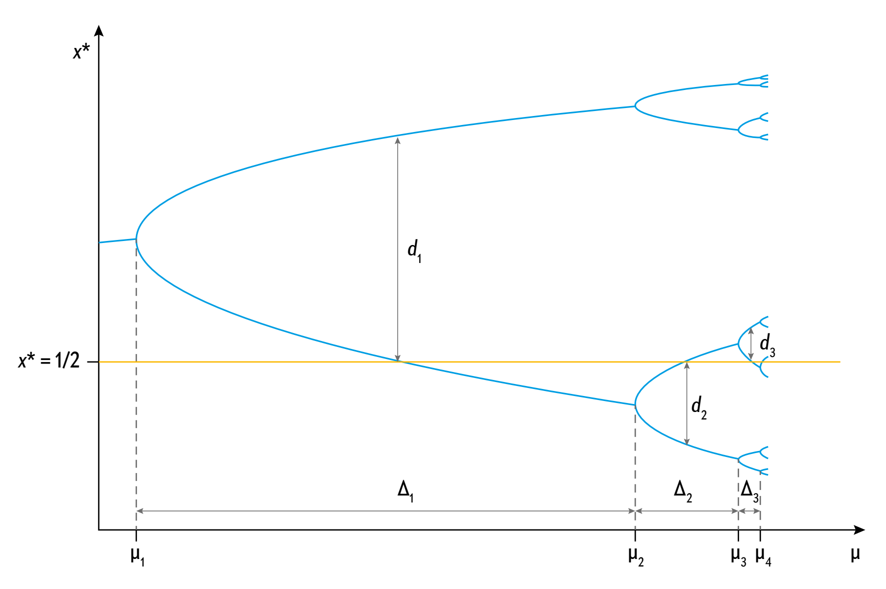
El árbol de Feigenbaum presenta una infinidad de características extraordinarias. Todas las regiones sombreadas corresponden a órbitas caóticas, aperiódicas. Si nos colocamos al final, en $\mu = 4$, donde el atractor caótico parece ocupar todo el intervalo $[0,1]$, y vamos disminuyendo el valor de μ, veremos que la banda caótica va estrechándose hasta bifurcarse en $\mu_B = 3{,}6785...$ Este proceso se repite una y otra vez, y aparece una cascada de bifurcaciones inversas de las bandas caóticas que, maravillosamente, converge también en μ_∞.

Las zonas claras, llamadas ventanas periódicas, corresponden a dinámicas periódicas que aparecen salpicando las zonas caóticas. En la figura hemos destacado el valor $\mu_P = 3{,}84$, que cae dentro de la mayor ventana periódica del árbol y donde aparecen órbitas de período tres. Y si hacemos una ampliación en cualquiera de las tres ramas se hará evidente la fractalidad del diagrama: en cada una nos encontraremos con un nuevo árbol de Feigenbaum en miniatura.

Comportamiento universal

En la década de los setenta, el físico matemático Mitchell Jay Feigenbaum, a la sazón en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en EE.UU., intentaba atacar el problema de la turbulencia. Varias simplificaciones de los complejos modelos con los que trabajaba lo condujeron al estudio de la secuencia de duplicación de períodos de la función logística. Con una calculadora programable, computó los valores aproximados μ_n donde se producían las sucesivas bifurcaciones:

$$\mu_1 = 3 \text{ (período 2)} \,,$$
$$\mu_2 = 3{,}449... \text{ (período 4)} \,,$$
$$\mu_3 = 3{,}544... \text{ (período 8)} \,,$$
$$\mu_4 = 3{,}564... \text{ (período 16)} \,,$$
$$...$$
$$\mu_\infty = 3{,}569 \text{ (período } \infty) \,.$$



LA CASCADA DE BIFURCACIONES del diagrama asociado a la función logística permite calcular las constantes de Feigenbaum δ y α, relacionadas con las distancias entre ramas y sus puntos de bifurcación. La primera se define como el límite cuando n tiende a infinito del cociente Δ_n/Δ_{n+1}, mientras que la segunda corresponde al límite de d_n/d_{n+1}.



Al hacerlo, pudo comprobar que las distancias entre los sucesivos puntos de bifurcación, $\Delta_n = \mu_{n+1} - \mu_n$, se contraían siguiendo una progresión aproximadamente geométrica:

$$\Delta_{n+1} \approx \Delta_n/\delta \,,$$

donde δ es una constante. Este número, hoy conocido como «constante de Feigenbaum», se define como Δ_n/Δ_{n+1} en el límite en el que n tiende a infinito, donde toma el valor

$$\delta = 4{,}6692016\ldots$$

Pero, además, Feigenbaum encontró otra constante similar en el eje de ordenadas. Para ver cómo aparece, consideremos la recta horizontal dada por $x^* = 1/2$ (*véase la figura superior*). Esta es la recta que determina los puntos superestables, aquellos en los que la primera derivada se anula. Vemos que, entre una bifurcación y la siguiente, la recta solo se cruza con una rama cada vez.

Feigenbaum observó que, si para cada intervalo (μ_n, μ_{n+1}) calculaba la distancia vertical d_n entre el punto superestable y la rama más cercana, se cumplía una relación similar a la anterior:

$$d_{n+1} \approx d_n/\alpha \,,$$

donde, en el límite en el que n tiende a infinito, obtenemos otra constante universal:

$$\alpha = 2{,}5029078\ldots$$

Pero ¿por qué decimos universal? Si representamos el árbol de Feigenbaum para la función seno,

$$f(x_n) = \mu\,\mathrm{sen}(\pi x_n)$$

(donde μ toma valores en [0,1]), podremos comprobar que el diagrama resultante es asombrosamente parecido al anterior: ambos muestran una ruta al caos por bifurcación de período (aunque las bifurcaciones se producen en valores distintos de μ), ventanas periódicas, bifurcaciones inversas... ¿A qué se debe?

Notemos que en ambos casos nos encontramos frente a funciones que, en el intervalo considerado, son suaves, convexas y presentan un solo máximo. Tales funciones se denominan «unimodales». En los años setenta, los matemáticos demostraron que, para todas las funciones unimodales de la forma

$$x_{n+1} = \mu f(x_n)$$

con $f(0) = f(1) = 0$, el orden en que aparecen las ventanas periódicas a medida que variamos μ es siempre el mismo. Por ello, dicha progresión se conoce como «secuencia universal» o «secuencia U».

La universalidad de la secuencia U es cualitativa, pues nos habla del orden de aparición de las ventanas periódicas. Sin embargo, las constantes de Feigenbaum muestran que existe también una universalidad cuantitativa: Feigenbaum demostró que δ y α toman los mismos valores en todas las funciones de este tipo.

Los resultados de Feigenbaum no hubieran sido tan sonados si posteriormente no se hubieran encontrado en todo tipo de experimentos. Esta cascada de bifurcaciones y su ruta al caos aparecen en sistemas que abarcan desde los láseres y las reacciones químicas hasta otros en hidrodinámica y electrónica. Y, en todos ellos, la determinación experimental de δ y α coincide con sus valores teóricos.

Esa universalidad supone un verdadero misterio, pues el grado de complejidad y las características particulares de todos esos sistemas físicos distan mucho de la extrema simpleza de las funciones unimodales consideradas aquí. El logro de Feigenbaum consistió en demostrar que las constantes δ y α son al fenómeno de la duplicación de período como π a las circunferencias. Pero observemos que δ y α aparecen como resultado de un proceso dinámico en multitud de sistemas físicos muy distintos, mientras que π describe una relación geométrica independiente del tamaño de las circunferencias. ¿Son entonces δ y α constantes matemáticas, como π, o constantes físicas, como la velocidad de la luz? Pregunta que en el fondo es más general, pues plantea la cuestión de si las matemáticas simplemente describen la naturaleza o si la gobiernan.

Para demostrar la universalidad de estas constantes, Feigenbaum recurrió a uno de los conceptos más profundos y transversales de la física de las últimas décadas: el de renormalización, cuyas aplicaciones van desde la física estadística hasta la física de partículas y la teoría cuántica de campos, y que dejaremos para la próxima columna.

Por desgracia, Mitchell Feigenbaum falleció este pasado 30 de junio. Gracias a su trabajo, hoy vislumbramos algo más de luz en el caos. IyC

PARA SABER MÁS

Universal behavior in nonlinear systems. Mitchell J. Feigenbaum en *Universality in Chaos*; dirigido por Predrag Cvitanović. Routledge, 1983.

Nonlinear dynamics and chaos. Steven H. Strogatz. Westview Press, 2001.

EN NUESTRO ARCHIVO

El número de Feigenbaum. *IyC*, diciembre de 1981.

Los atractores extraños son configuraciones matemáticas en equilibrio entre orden y caos. Douglas R. Hofstadter en *IyC*, enero de 1982.



150 ANYS DE TAULES PERIÒDIQUES A LA UNIVERSITAT DE BARCELONA

Dirigido por Santiago Álvarez y Claudi Mans
Edicions Universitat de Barcelona, 2019

La tabla periódica, más allá de Mendeléiev

Una historia colectiva de la creatividad en aulas y laboratorios que imbrica ciencia, política y cultura

2019 ha sido reconocido como el Año Internacional de la Tabla Periódica por constituir el sesquicentenario de la clasificación de los elementos químicos presentada por el químico ruso Dimitri Ivánovich Mendeléiev en 1869. Aunque la invención de este icono de la química suele vincularse a un momento de genialidad del químico ruso, en las últimas décadas los historiadores de la ciencia han cuestionado esta visión. La investigación histórica ha mostrado que la tabla periódica fue el resultado de un esfuerzo colectivo de diversos profesores de química que, impulsados por una intencionalidad pedagógica, buscaron la forma más adecuada de organizar los elementos químicos entonces conocidos. De este modo, la tabla periódica adoptó formas diversas en continente y contenido. Las páginas de los libros de química de los últimos 150 años y las paredes de algunos espacios de ciencia todavía dan cuenta de ello. Esto es precisamente parte de lo que el lector podrá encontrar al sumergirse en esta obra coordinada por Santiago Álvarez y Claudi Mans.

150 anys de taules periòdiques a la Universitat de Barcelona es un texto trilingüe (en catalán, castellano e inglés) que muestra el lenguaje universal que la tabla periódica supone para la química. Un lenguaje que va más allá de los símbolos o los nombres de los elementos y que incluye colores, columnas y filas.

A lo largo de una selección de 114 tablas periódicas, el lector podrá descubrir símbolos y nombres de elementos que pasaron a los anales de la historia de la ciencia, como el glucinio, Gl (hoy, berilio, Be); el celtio, Ct (hoy, hafnio, Hf) o el kurchatovio, Ku (hoy, rutherfordio, Rf). Si bien pudieran parecer anecdóticos, los cambios en las denominaciones de los elementos químicos reflejan el carácter colectivo y controvertido del descubrimiento de un elemento químico, a la par que se revelan de utilidad para la datación de las tablas periódicas. Asimismo, el lector podrá comprobar que los colores empleados para rellenar las casillas donde se sitúan los elementos químicos varían de una tabla periódica a otra, pudiendo informar sobre el estado físico del elemento (sólido, líquido o gas), su carácter radiactivo o sintético, o la existencia de propiedades químicas análogas entre elementos.

En las tablas periódicas convencionales, los elementos con propiedades químicas análogas suelen situarse en la misma columna. Sin embargo, no es así en los formatos adoptados por otras clasificaciones, como la clasificación espiral de John D. Clark de 1933 (que inspiró el sistema periódico publicado por la revista *Life* en 1949) o la clasificación galáctica propuesta por Philip J. Stewart en 2007. Ambos ejemplos constituyen una pequeña muestra de la creatividad subyacente tras la historia de la tabla periódica [*véase* «La tabla periódica», por Eric R. Scerri; Investigación y Ciencia, abril de 2008].

Otra de las conclusiones a las que han llegado los historiadores de la ciencia en los últimos años es que la tabla periódica no fue un modelo único propuesto por Mendeléiev y universalmente aceptado por la comunidad científica desde su presentación hace 150 años. Si bien Mendeléiev falló en buena parte de las predicciones sobre los elementos que debían ocupar algunos huecos de su tabla, las predicciones acertadas sirvieron para que, en las últimas décadas del siglo xix, esa tabla fuera considerada de interés por la comunidad científica del momento. No obstante, en las aulas, la tabla periódica estuvo lejos de ser aceptada de forma unánime.

En los últimos años se ha estudiado la recepción y circulación del sistema periódico de Mendeléiev en diversos territorios, como Rusia, Alemania, Noruega, Francia, Dinamarca, España, Portugal, Italia o Japón. En esta línea, esta obra es de gran interés para abordar el caso catalán. Tal y como el lector podrá comprobar, la tabla periódica de Mendeléiev tuvo un papel poco destacado en los manuales de finales del siglo xix, como el publicado en 1878 por el catedrático José Ramón de Luanco. Por el contrario, buena parte de los manuales optaban por otras clasificaciones, como las listas de elementos ordenados alfabéticamente con sus principales características. Asimismo, existieron otras representaciones diferentes a las de Mendeléiev que inspiraron a los docentes para sus clases. Tal es el caso de la tabla periódica de 1925 del químico alemán Andreas von Antropoff, la cual inspiró al profesor de química valenciano Antonio García Banús en 1933 para el mural de sus clases en la Universidad de Barcelona.

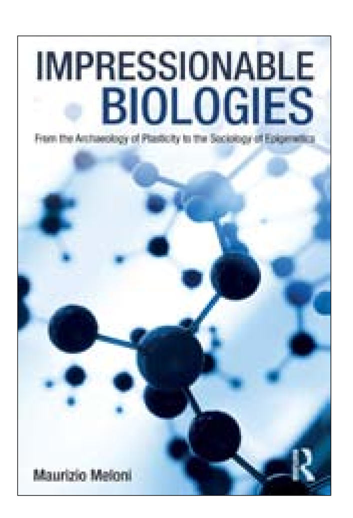
Pero, además, la historia de la tabla periódica no es solo la historia de un producto colectivo de la ciencia en las aulas que circuló por manuales y murales, por salones de clase y laboratorios. Es también un reflejo de la historia política. Si en la tabla periódica de Mendeléiev encontramos un reflejo del orden social y político por el que abogó para la Rusia zarista del siglo xix, otras tablas periódicas del siglo xx también se revelan imbricadas con la política.

Tal es el caso del sistema periódico de Antropoff al que aludíamos antes. Al sumergirse en esta obra, el lector descubrirá cómo el célebre químico estadounidense Linus Pauling se inspiró en él para su manual de química, aunque sin citar

al alemán, probablemente por su proximidad al régimen nazi. Otro ejemplo que imbrica ciencia y política a través de la tabla periódica lo encontramos en el mural situado actualmente en el aula 111 de la facultad de filología de la Universidad de Barcelona. Tal y como explica Mans, se trata de la tabla periódica de García Banús, que fue catedrático de química orgánica en la Universidad de Barcelona desde 1915 hasta su exilio en 1938. Su tabla, inspirada en la de Antropoff, acompañó en el salón de clases a varias generaciones de estudiantes de química de la Universidad de Barcelona incluso durante la dictadura franquista. Esta historia, la de la tabla de un profesor republicano que se inspiró en un profesor nazi y que perduró en el franquismo, muestra cómo la historia de la tabla periódica refleja también algunos de los capítulos de nuestra historia política.

A través de las páginas de esta obra, imprescindible en la biblioteca de todo lector interesado en el sistema periódico, es posible comprobar cómo la tabla periódica trasciende el ámbito de la química y de la ciencia. Hablar de la tabla periódica es hablar de una forma de ordenar y distribuir elementos, no necesariamente químicos. Así, el lector podrá encontrarse con tablas periódicas de la ortografía, de los tipos de letras, de la mercadotecnia o de los ataques cibernéticos. Una muestra más de la creatividad subyacente tras la historia de la tabla periódica. Una historia colectiva que en *150 anys de taules periòdiques a la Universitat de Barcelona* llevará al lector desde murales cerámicos a relojes y abanicos, de las aulas a los laboratorios, de la política a la cultura. Desde una historia de la tabla periódica centrada en un único individuo, hasta una historia plural, viva y rebosante de creatividad.

—Luis Moreno Martínez
Instituto Interuniversitario López Piñero
Universidad de Valencia



IMPRESSIONABLE BIOLOGIES
FROM THE ARCHAEOLOGY OF PLASTICITY TO THE SOCIOLOGY OF EPIGENETICS
Maurizio Meloni
Routledge, 2019

Plasticidad biológica

La epigenética y el cuestionamiento de la centralidad del gen en la era posgenómica

No es conforme con la ciencia empírica mezclar su metodología con las técnicas epistemológicas empleadas en ciencias sociales y en filosofía del conocimiento. Si el lector logra separar los planos de una y otras sacará provecho del libro de cabecera, el cual trata sobre una de las áreas de la biología más productivas y de mayor futuro: la plasticidad epigenética.

La primera connotación que evoca el término *plasticidad* es la relacionada con las sinapsis neuronales, de la que hablaron los fundadores de la neurociencia moderna para designar cambios que dependen de la actividad neuronal. La forma más estudiada de plasticidad sináptica es la que se encuentra en el hipocampo, región cerebral de particular interés para el aprendizaje y la memoria. En biología, en cambio, la plasticidad es la capacidad de las células o de los organismos para modificar sus propiedades y comportamiento en respuesta a los cambios producidos en el medio. Intercambia a menudo su significado con el de elasticidad e incluso polimorfismo, maleabilidad o reversibilidad. De hecho, la plasticidad abarca múltiples procesos de tipos muy dispares. Además de una plasticidad sináptica tenemos una morfológica, inmunitaria, psíquica, conductual o mental. De igual modo, la embriología aborda la plasticidad de reprogramación de las células, la inmunología estudia la producción de anticuerpos contra nuevos patógenos y la neurociencia se ocupa del establecimiento de conexiones sinápticas. La epigenética, por su parte, nos remite a la maleabilidad de la expresión genómica.

El término fue acuñado en los años cuarenta del siglo pasado por Conrad Hal Waddington en sus estudios del desarrollo embrionario. Se propuso crear una nueva disciplina que fundiera la embriología y la genética. Durante mucho tiempo, se dio por sentado que las células quedaban circunscritas a un linaje determinado y que así persistían, fijas y estables, en su estado diferenciado. Pero hoy sabemos que nada hay estanco ni cerrado, sino que tales procesos y estados se hallan sujetos a una regulación dinámica y se alteran sin dificultad.

Así, se han reprogramado células para expresar genes característicos de otro tipo celular, en particular células pluripotentes. En las fases iniciales de la embriogénesis, las células pueden diferenciarse y originar otras que conformarán los distintos tejidos que concluirán en la configuración del organismo entero e incluso el tejido extraembrionario, como la placenta. Ese proceso de especificación celular está controlado por la interrelación entre factores endógenos y exógenos. En el estadio de blastocisto del embrión, las células de la masa interna, de las que derivan las células madre, son pluripotentes; es decir, tienen capacidad para formar las tres capas germinales: el endodermo, el ectodermo y el mesodermo.

Las células de cada una de esas capas darán origen a los tejidos respectivos y no cambiarán fácilmente de destino: un hepatocito no se trocará espontáneamente en un cardiomiocito. Pero esas células embrionarias son plásticas. Su destino final puede cambiar si se trasplantan y se exponen a un microentorno distinto. Dicha plasticidad se estudia a nivel del genoma (mediante el análisis de las modificaciones epigenéticas), de la célula individual y del organismo entero (durante el desarrollo del embrión o los cambios de conducta en adultos).

El fenotipo del organismo es producto de sus genes y del entorno. Pero los datos obtenidos a partir de gemelos revelan que la variación en las secuencias de ADN y en las diferencias ambientales no agotan las causas de la variación observada en

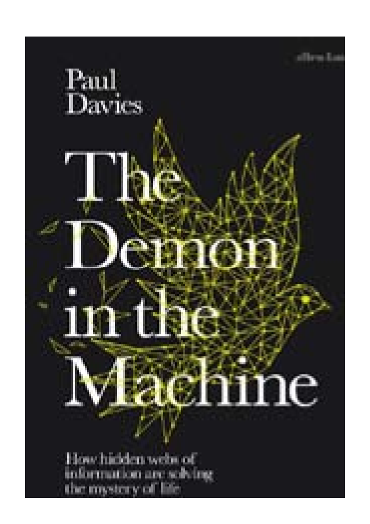
los rasgos complejos y las enfermedades. Los factores epigenéticos, que residen en la interfaz entre genes y entorno, desempeñan un papel central en la variabilidad fenotípica.

Debido a que los factores epigenéticos son a menudo maleables y plásticos, y reaccionan por ende ante determinados estímulos y señales del medio interno y externo, las modificaciones epigenéticas del ADN pueden resultar cruciales para comprender las bases moleculares de fenotipos complejos. Esos cambios epigenéticos inducidos pueden cristalizar y propagarse durante la división celular, lo que conlleva el mantenimiento permanente del fenotipo adquirido. Por eso, suele afirmarse que en la plasticidad epigenética puede esconderse el mecanismo molecular básico que subyace a caracteres complejos y numerosas enfermedades [*véase* «Mapa de la regulación epigenética», por Dina Fine Maron; Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

En un artículo célebre, Natan P. F. Kellermann, psicólogo experto en supervivientes del Holocausto, se preguntaba en el título si había una transmisión epigenética del trauma; si las pesadillas y tormentos podían heredarse. Tras responder afirmativamente, declaraba que la epigenética añadía una nueva dimensión psicobiológica, más integral, a la explicación de la transmisión del trauma a través de las generaciones. Los descendientes estaban marcados epigenéticamente con un revestimiento químico de sus cromosomas, lo que representaría una suerte de «memoria biológica» de lo experimentado por los progenitores [*véase* «Experiencias heredadas», por Ulrike Gebhardt; Mente y Cerebro n.º 91, 2018].

Meloni, profesor de sociología en la Universidad Deakin, en Australia, y teórico social dedicado a las relaciones entre ciencia y sociedad, centra su atención en las cuestiones posgenómicas que están emergiendo y que comienzan a minar las coordenadas intelectuales establecidas en el debate sobre las relaciones entre biología y sociedad. Muchas de estas coordenadas se reputaron por ciertas durante el siglo xx, pero no parece que puedan ya sostenerse cuando se niega la existencia de una distinción nítida y tajante entre causas biológicas y causas sociales, terreno en que se mueve *Impressionable biologies*. La inclinación social del autor se refleja en el título de una obra precedente, *Political biology*, el cual hace un maridaje de dos términos que resulta incómodo para la genética y para la epigenética por las continuas concesiones a especulaciones sin base empírica.

—Luis Alonso



THE DEMON IN THE MACHINE
HOW HIDDEN WEBS OF INFORMATION ARE FINALLY SOLVING THE MYSTERY OF LIFE
Paul Davies
Allen Lane, 2019

La vida contra la entropía

Un tratado sobre física y biología que toma el relevo donde lo dejó Erwin Schrödinger

Durante largo tiempo, la biología se basó en teorías puramente cualitativas y en ensayos con sujetos experimentales que rehusaban hacer lo mismo dos veces. Hoy, sin embargo, la disciplina se sustenta en una montaña de datos. Impulsada por las revoluciones en biología molecular y computación acaecidas durante el siglo xx, la biología ha pasado de observar y describir a secuenciar y calcular. Esa tendencia la ha acercado a la física, lo que ha llamado la atención de un buen número de expertos en esta ciencia.

Uno de los pensadores que han trascendido la frontera entre ambas disciplinas es el cosmólogo y escritor Paul Davies. En su último libro, *The demon in the machine* («El demonio en la máquina»), defiende que el concepto de información no solo es fundamental para la biología, sino también para entender la propia vida. Davies sigue así los pasos del célebre físico austriaco Erwin Schrödinger, quien en 1943 impartió una serie de conferencias en el Trinity College de Dublín (publicadas el año siguiente con el título *¿Qué es la vida?*) donde desgranaba buena parte de los principios de la genética molecular una década antes de que se descubriera la estructura del ADN.

En su calidad de experto en la teoría cuántica, a Schrödinger le sorprendió que los átomos, a pesar de comportarse de un modo profundamente imprevisible, pudieran dar lugar a sistemas muy ordenados, capaces de persistir durante largos períodos de tiempo e incluso de replicarse. Ese comportamiento parece sortear la segunda ley de la termodinámica, la cual establece que el valor total de la entropía (una medida del desorden de un sistema) no puede sino aumentar.

Este apunte histórico le sirve a Davies de punto de partida. Como cosmólogo, sin embargo, su principal pregunta no surge al considerar lo extremadamente pequeño, sino lo incomparablemente grande. Si la vida existe en otras partes del universo, se pregunta Davies, ¿cómo podríamos reconocerla? Buscar en otros planetas signos de agua líquida, de química orgánica o de gases atmosféricos, como oxígeno, dióxido de carbono o metano, tiene sentido dadas las características del único ecosistema que conocemos. Pero a Davies le parece sumamente estrecho de miras —y al autor de estas líneas también— dar por sentado que esos elementos constituyen la esencia de la vida.

Davies defiende que las características que definen la vida se entienden mejor en términos de información. Es este un punto de vista mucho menos absurdo de lo que pudiera parecer. También la energía es abstracta y, aun así, la aceptamos como factor causal sin demasiados problemas. De hecho, la energía y la información guardan una íntima relación a través de la entropía.

Davies explica esa conexión a partir del demonio de Maxwell. En el siglo xix, el físico James Clerk Maxwell propuso un célebre experimento mental en el que

consideraba una hipotética bestia diminuta encaramada a una abertura entre dos recipientes de gas. Dependiendo de la energía cinética de las moléculas, el animalillo solo deja pasar unas u otras. De este modo, y al menos en principio, podría hacer que todas las moléculas rápidas acabasen en un recipiente y todas las lentas en el otro. Ello reduciría la entropía total del sistema (al incrementar el orden) y, en consecuencia, violaría la segunda ley de la termodinámica.

La resolución a esta paradoja parece residir en el hecho de que, para llevar a cabo su tarea, el demonio debe primero obtener información sobre las propiedades de cada molécula. Y para ello necesita algún dispositivo de registro, como un cerebro o un cuaderno diminuto. Al tener en cuenta los procesos asociados al tratamiento de la información en dicho registro, puede verse que la entropía total (la del gas más la del demonio) siempre aumenta.

Desde esta perspectiva, cabe considerar que los sistemas vivos se hallan compuestos por innumerables de estos «demonios» (proteínas y otra maquinaria celular) que mantienen el orden a nivel local a costa de bombear desorden (a menudo en forma de calor) al entorno. Davies actualiza hábilmente la observación de Schrödinger usando la teoría de la información de Shannon, las máquinas de Turing (computadoras universales), las máquinas de Von Neumann (constructores universales capaces de autorreplicarse), la biología molecular, la epigenética, la teoría de la información integrada (referida a la consciencia) y la biología cuántica (encargada de estudiar los efectos cuánticos en procesos que van desde la fotosíntesis a la coloración de los insectos y el vuelo de las aves).

Aunque hilar una narrativa coherente a partir de temas tan dispares podría resultar complicado, Davies lo logra de manera admirable, permitiéndose tan solo alguna que otra incursión en cuestiones que parecen un tanto fuera de lugar. Una es la breve reseña a su trabajo sobre el cáncer, enfermedad que no ve tanto como un ejemplo de maquinaria celular estropeada, sino como una regresión a un estadio evolutivo anterior, cuando los organismos unicelulares respondían a las condiciones adversas reproduciéndose.

¿Qué consecuencias prácticas tiene considerar la vida desde el punto de vista de la información? Aún no lo sabemos, pero podemos conjeturar. En primer lugar, si las características esenciales de la vida son entrópicas, puede que sea un error basarnos en la química a la hora de buscar vida extraterrestre. Podría resultar más útil intentar identificar fenómenos como la «antiacreción»: la transferencia regular de materia desde la superficie de un planeta hacia el espacio. La Tierra lleva experimentando este proceso desde los años cincuenta, cuando comenzamos a contrarrestar el tráfico unidireccional de asteroides y meteoritos hacia nuestro planeta con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales. Cabe argumentar que tales situaciones no solo son compatibles con la presencia de vida, sino que resulta casi imposible explicarlas de otra manera.

Por otro lado, una definición de vida que no se centre en un sustrato basado en el carbono, sino en sus características informacionales, podría obligarnos a reconsiderar nuestra postura sobre los sistemas artificiales integrados en los ordenadores. Ya estamos empezando a tratarlos como compañeros, pero ¿podríamos llegar a considerarlos criaturas vivas en vez de meras imitaciones? Que nos perdone Charles Darwin, pero hay cierta grandeza en esta visión de la vida.

Además de tener intereses eclécticos, Davies es iconoclasta y de ideas fijas. Aunque es evidente que no cree en ninguna fuerza vital más allá de la física o la química, tiene poco tiempo para el reduccionismo, y no cree que sea posible explicar por completo la vida en términos de leyes generales (como la segunda ley de la termodinámica), ni siquiera en teoría.

En un último guiño a Schrödinger, que pensaba que una adecuada comprensión de la vida podría revelar «otras leyes de la física desconocidas hasta el momento», Davies concluye argumentando que la biología aún podría encerrar profundas lecciones para la física. Se trata de una conclusión muy especulativa y, en opinión de quien escribe —un biólogo—, probablemente falsa. Con todo, no es una crítica. Más bien al contrario: si hubiera más autores que se equivocasen de manera tan estimulante, tal vez nos resultaría más fácil descubrir la verdad.

—Timo Hannay
Fundador de SchoolDash, compañía de análisis de datos educativos

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 565, págs. 427-428, 24 de enero de 2019. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



DEMOSTRACIONES VISUALES EN MATEMÁTICAS
VER PARA PENSAR

Ana Carvajal Sánchez
y José Luis Muñoz Casado
Catarata, 2019
ISBN: 978-84-9097-714-9
128 págs. (12 €)



EL MUSEO DE CIENCIA TRANSFORMADOR
UN ENSAYO A FAVOR DE LA RELEVANCIA SOCIAL DEL MUSEO CONTEMPORÁNEO

Guillermo Fernández, 2019
ISBN: 978-84-09-07652-9
244 págs. (20,80 €)
Accesible gratuitamente en línea en
elmuseodecienciatransformador.org



YDEA ASTRONOMICA DE LA FABRICA DEL MUNDO Y MOVIMIENTO DE LOS CUERPOS CELESTIALES

Juan Cedillo Díaz. Edición de M. Á. Granada y Félix Gómez Crespo. Edicions de la Universitat de Barcelona, 2019
ISBN: 978-84-9168-164-9
484 págs. (30 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

SEPTIEMBRE

1969

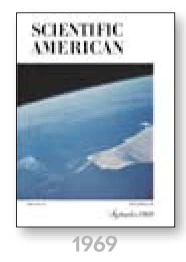
Luna inquieta

«El equipo sismométrico que los astronautas depositaron en la Luna empezó a informar de temblores en cuanto quedó instalado. Las primeras señales las produjeron Armstrong y Aldrich al moverse en los alrededores ocupados en sus tareas. También el despegue del módulo lunar *Eagle* fue grabado nítidamente. El primer grupo de eventos de alta frecuencia parecían un misterio, pero al fin se atribuyeron a distintos procesos de ventilación. "No pensábamos que el módulo resultara ser un monstruo tan viviente y activo", afirmó Gary Latham, del Observatorio Lamont-Doherty y diseñador del sismómetro. El segundo grupo de eventos evidentemente delataban el deslizamiento de rocas por las empinadas laderas de los cráteres. La clase de eventos más reveladores, más de veinte en total, se cree que son auténticamente tectónicos, lo cual implica la existencia de actividad bajo la superficie.»

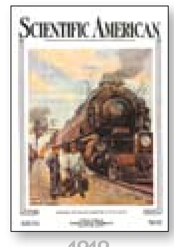
«Poliagua»

«La existencia de un polímero estable del agua, de propiedades muy distintas a las del agua ordinaria, ha sido comprobada por un equipo de investigación conjunto de la Oficina Nacional de Normas de EE.UU. y de la Universidad de Maryland. La primera descripción de esta "nueva" sustancia, que ha recibido el nombre de poliagua, o agua polimerizada, la hicieron químicos rusos a principios de la década de 1960. Los hallazgos recientes indican que la poliagua es una cadena polimérica estable formada por moléculas de agua común. En contraste con esta, la poliagua conserva su estructura molecular hasta los 500 °C. Pero si es tan estable, ¿por qué nunca se encontró en la naturaleza?»

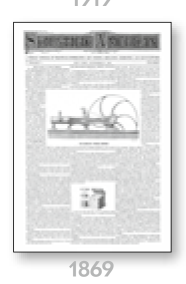
Se comprobó más tarde que el agua polimerizada era agua ordinaria contaminada por compuestos orgánicos (entre ellos, posiblemente sudor).



1969



1919



1869

1919

Mulas para el regadío

«Entre 1907 y 1909, el Servicio de Recursos Hídricos de EE.UU. construyó en el estado de Washington el Canal de Riego de Tieton, el cual ha estado conduciendo agua durante los últimos ocho años. Después de que se añadieran unas 3200 hectáreas a esa demarcación de regadío, fue necesario aumentar la capacidad de conducción del canal. Para ampliar su sección, sobre cada lateral se añadió un segmento de remate adicional moldeado in situ, tras retirar las riostras. Un problema no resuelto fue el transporte del material de construcción hasta los puntos de trabajo. Fue necesario emplear el canal mismo como carretera para acabar de distribuir el material entre los trabajadores. Las mulas realizaron el acarreo en tiempos muy satisfactorios [*véase la ilustración*].»

Aviación puntera

«Durante la guerra, el nogal negro y la caoba fueron prácticamente las únicas maderas que se usaron para las hélices. Como el suministro de esas variedades no bastaba para alcanzar la producción necesaria, hubo que buscarles sustitutos. El Laboratorio de Productos Forestales de EE.UU., en Madison (Wisconsin), sugirió algunas maderas nativas que parecían adecuadas. Así se puso en producción el roble blanco aserrado en cuartos para hélices de combate; otras maderas, como el abedul y el arce, se emplearon en aviones de entrenamiento, pero no para hélices de combate. Hoy día casi todas las hélices se hacen con cola de piel. Esta no es impermeable, y bajo una humedad extrema pueden abrirse las junturas.»



1919: Una mula acarrea materiales para renovar el mismo canal que utiliza para el transporte.

1869

Un precio justo

«En París se ha creado un invento para zanjar las disputas entre los clientes de los coches de alquiler y los cocheros de estos. Según se informa, el *compteur méchanique*, o máquina calculadora, no solo calcula la distancia recorrida, sino que también indica la suma exacta de dinero que debe pagarse al cochero. En el respaldo del asiento del conductor hay montadas dos esferas; una contiene un reloj y la otra marca el recorrido.»

El paraíso encontrado

«Los escritores teológicos han estado desde siempre cavilando sobre cómo conocer la ubicación geográfica —por así decirlo— del paraíso. Pero al fin tenemos un filósofo lo bastante valiente que promete sacarnos de nuestra perplejidad, D. Mortimer, doctor en medicina. Según su teoría, "hay un vasto globo o mundo lejano dentro de la fotosfera que rodea al fuego etéreo, el sol". Afirma que él ha aplicado a ese gran globo central la revelación divina, y que está claramente convencido de que "el globo así percibido es el Imperio Celestial, donde los justos de esta Tierra encuentran su hogar futuro", información por toda la cual las almas indecisas y las creyentes estarán eternamente agradecidas al ilustrado doctor.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXI, N.º 13, 27 DE SEPTIEMBRE DE 1919



INFORME ESPECIAL

EL FUTURO DEL ÁRTICO

Mark Fischetti, Katie Peek y Kathrin Stephen

Mientras el calentamiento global está alterando los paisajes árticos, cinco países reclaman derechos sobre su fondo marino. El conflicto geopolítico por la explotación de los recursos polares necesitará grandes dosis de diplomacia, cooperación y ciencia.

COMPUTACIÓN

Imaginación artificial

George Musser

¿Podrían las máquinas ser creativas y tener sentido común?



HISTORIA DE LA CIENCIA

Einstein, Newton o Pasteur no eran unos santos

Yannick Fonteneau

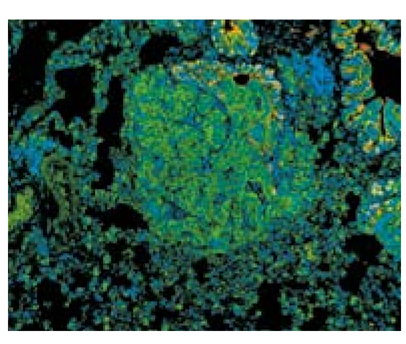
¿Por qué nos decepciona saber que Einstein era xenófobo o que Newton era manipulador y esotérico? Para comprenderlo debemos remontarnos al siglo xvii, cuando los científicos empezaron a desempeñar un papel político.

MEDICINA

Lo que Darwin nos enseña sobre el cáncer

James DeGregori y Robert Gatenby

Los principios de la evolución y la selección natural ofrecen un nuevo enfoque terapéutico.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes*, *El balanceo de las hojas al caer* y *La vida contra la entropía*; Pedro Pacheco González: *Apuntes*; Anna Romero: *Apuntes*; M. Gonzalo Claros: *De las redes neuronales a la mente*; Mercè Piqueras: *Micorrizas: la simbiosis conquista la tierra firme*; Fabio Teixidó: *¿Cómo se engrosa un tronco?* y *¿Se está desmoronando la Antártida?*; Alfredo Marcos: *Los pilares de la mente*; Andrés Martínez: *La influencia de la vida social en la salud*; Bartolo Luque: *Geometría tropical*; Miguel A. Vázquez Mozo: *La armonía en las leyes de la naturaleza*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España